HARVARD MEDICAL
LIBRARY

RÖNTGEN

THE LLOYD E. HAWES
COLLECTION IN THE
HISTORY OF RADIOLOGY

21.6.190

PHYSIKAL. JNSTITUT
UNIVERSITÄT
HEIDELBERG

6 Mark bezahlt für Rechnung 31.12.
am 6.2.1908 an Buchhändler G. K
von G. Quinck

PROFESSOR
DR G. QUINCKE
HEIDELBERG

Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
Open Knowledge Commons and Harvard Medical School

http://www.archive.org/details/elektronenoderdi00lodg

Im gleichen Verlage erschien:

Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand. Vortrag, gehalten auf der 49. Jahresversammlung der Britischen Association zur Förderung der Wissenschaften in Sheffield am 22. August 1879 von William Crookes, F.R.S. Deutsch herausgegeben von Dr. Heinrich Gretschel. Mit 21 Figuren. Vierter unveränderter Neudruck. 1907. 1 M. 50 Pf.

Elektronen

oder

die Natur und die Eigenschaften der negativen Elektrizität.

Von

Sir Oliver Lodge
F. R. S.; D. Sc.

Aus dem Englischen übersetzt
von
Prof. **G. Siebert.**

Mit 24 Figuren im Text.

Leipzig
Verlagsbuchhandlung von Quandt & Händel.
1907.

Von folgenden in dem vorliegenden Buche erwähnten Werken sind deutsche Ausgaben erschienen:

Curie, S., Untersuchungen über die radioaktiven Substanzen. Übersetzt von W. Kaufmann. Braunschweig, 1904.

Lodge, O., Neueste Anschauungen über Elektrizität. Deutsch von A. v. Helmholtz und E. du Bois-Reymond. Leipzig, 1896.

Rutherford, E., Die Radioaktivität. Deutsch von E. Aschkinass. Berlin, 1907.

Thomson, J. J., Die Entladung der Elektrizität durch Gase. Deutsch von P. Ewers. Leipzig, 1900.

—, Elektrizitätsdurchgang in Gasen. Deutsch von E. Marx. Leipzig, 1906.

—, Elektrizität und Materie. Deutsch von G. Siebert. Braunschweig, 1904.

Vorwort.

Im Jahre 1902 wurde ich vom Vorsitzenden der Institution of Electrical Engineers aufgefordert, in dieser Gesellschaft einen Vortrag über neue Fortschritte in der Erkenntnis der Natur der Elektrizität zu halten, mit besonderer Rücksicht auf ihre diskontinuierliche oder atomistische Struktur. Dieser Vortrag erschien in bedeutend erweiterter Form im 32. Band des Journals der Institution und bildet den Kern des vorliegenden Buches.

Es sind jetzt viele Zusätze gemacht und einige von den Schwierigkeiten berührt worden, die neuerdings gegen die Möglichkeit einer elektrischen Theorie der Materie geltend gemacht worden sind. Sie fallen in die neueste Zeit, so daß sie selbst in meiner „Romanes Lecture", die ich vor der Universität von Oxford gehalten habe und die unter dem Titel *Modern Views of Matter* 1903 erschienen ist, nicht erwähnt werden konnten.

Der wichtigste Zusatz besteht in einer eingehenderen Darstellung des Beweises, daß die Masse oder Trägheit eines Elektrons rein elektrischer Natur ist, eine Untersuchung, die gewöhnlich hinsichtlich ihrer experimentellen Seite mit dem Namen Kaufmanns verknüpft wird, die sich aber natürlich auf die Arbeiten zahlreicher früherer und zeitgenössischer Forscher stützt. Der Beweis, daß das materielle Atom wirklich aus solchen Elektronen besteht und daß seine Masse ebenfalls rein elektromagnetischer Natur ist, ist nicht erbracht; die elektromagnetische Theorie der Materie muß im Gegensatz zur elektromagnetischen Lichttheorie gegenwärtig lediglich als eine Arbeitshypothese betrachtet werden. Es ist eine Hypothese von anregendem Charakter, die viel Wahr-

scheinlichkeit für sich hat, aber ob sie richtig ist, ist noch eine offene Frage, die auch wahrscheinlich nicht sehr bald beantwortet werden wird.

Herrn Professor Larmor bin ich zu Dank verpflichtet für Belehrung über einige neue theoretische Arbeiten und für den im Anhang M behandelten Gegenstand; ebenso habe ich Herrn Gwilym Owen von der Universität Liverpool für seine Unterstützung bei der Revision der Druckbogen zu danken.

Als Einleitung zu einem verwandten Gegenstand sind R. J. Strutts *Becquerel Rays* dringend zu empfehlen, und Professor Rutherfords *Radioactivity* ist als klassisches Werk hinreichend bekannt. Ich habe es unterlassen, die Gegenstände ausführlich zu behandeln, die so bequem in den genannten Werken zu finden sind. Auch was die Erscheinungen der „Ionisierung“ betrifft, so habe ich mich auf das allerwichtigste beschränkt, was nicht leicht war, wenn ich nicht in die Einzelheiten eingehen wollte, mit denen allerdings der Forscher bekannt sein muß. Professor J. J. Thomsons *Discharge of Electricity through Gases* enthält eine Fülle von Belehrung und höchst wertvoller Originalarbeit.

Das vorliegende Buch ist im allgemeinen für Studierende der allgemeinen Physik und zum Teil für Spezialisten bestimmt. Der größte Teil desselben kann als Darstellung eines Gegenstandes betrachtet werden, der das Interesse aller Gebildeten in hohem Grade beanspruchen darf.

Birmingham, Universität, Juli 1906.

Oliver Lodge.

Bedeutung der in diesem Buche benutzten Bezeichnungen.

Elektron = Einheit der elektrischen Ladung oder Atom negativer Elektrizität.

e = Betrag dieser — positiven oder negativen Ladung; ungefähr 3×10^{-10} elektrostatische Einheiten.

E = eine elektromotorische Kraft oder Stärke eines elektrischen Feldes.

H = die Stärke eines magnetischen Feldes.

m = Masse oder Trägheit, namentlich die Masse eines Elektrons.

a = gewöhnlich die lineare Dimension eines Elektrons (ungefähr ein Hunderttausendstel von b).

b = die lineare Dimension eines Atoms Materie (ein Zehnmilliontel Millimeter).

Ion = ein Atom Materie verbunden mit einer nicht ausgeglichenen — positiven oder negativen-elektrischen Ladung; die Ursache der chemischen Affinität.

$\varkappa$ = Faradays Dielektrizitätskonstante oder spezifische Induktionskapazität des freien Äthers.

μ = die magnetische Permeabilität des freien Äthers.

[Dies sind die beiden wichtigen Konstanten des Äthers, deren Wert und Natur noch nicht bekannt sind. Nur ihr Produkt ist bekannt.]

v = Geschwindigkeit des Lichtes im Vakuum = $1/\sqrt{\mu\varkappa} = 3 \times 10^{10}$ cm pro Sekunde.

u = Geschwindigkeit eines Teilchens.

Inhaltsübersicht.

Kapitel		Seite
1.	Eigenschaften einer elektrischen Ladung	1
	Ladung in gleichförmiger Bewegung	3
	Energieübertragung	6
	Beschleunigte Ladung	7
2.	Elektrische Trägheit	11
	Elektrische Trägheit oder Masse; Fortsetzung	12
	Wirkung der Konzentration	14
	Rückblick	15
	Historische Bemerkungen	16
3.	Die Anfänge der atomistischen Theorie der Elektrizität	18
4.	Die Anfänge der Elektronentheorie	22
	Die Leitung in Gasen und die Einzelexistenz der Elektrizitätseinheit	22
	Kathodenstrahlen	24
	Natur der Kathodenstrahlen	28
5.	Bestimmung der Geschwindigkeit und des elektrochemischen Äquivalents der Kathodenstrahlen	37
	Weitere Messungen der Kathodenstrahlengeschwindigkeit und des Verhältnisses e/m mit Hilfe elektrostatischer Ablenkung	43
	Messung der Geschwindigkeit durch gleichzeitige elektrische und magnetische Ablenkung	46
	Wirkung auf Lenardstrahlen	48
	Direkte Bestimmung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen	49
6.	Bestimmung des elektrochemischen Äquivalents durch die Entladung in ultraviolettem Licht	53
	Positive und negative Träger	60

Kapitel Seite

7. Ionisierung von Gasen 64
Verhalten heißer Metalle in Gasen 65
Messung des Ionisierungsstroms 66
Versuche über Verdichtung von Feuchtigkeit 68

8. Bestimmung der Masse eines Elektrons 70
Aitken und Wolkenkerne 72
J. J. Thomson und Elektrische Kerne 73
Wilsons Versuche über Wolkenbildung 76
Prof. Stokes und fallende Kugeln 78
J. J. Thomsons Zählversuch 79
Ergebnis 82

9. Weitere Einzelheiten über Elektronen und Ionen . . . 83
Bestätigende Messungen der Ladung 83
Thomsons Schlußfolgerungen 85
Schätzung der Größe 86
Durchdringlichkeit der Materie für Elektronen 88
Wirkung eines Zusammentreffens 91

10. Die Elektronentheorie der Leitung und Strahlung . . 95
Leitung 96
Strahlung 98

11. Weitere Diskussion der Elektronentheorie der Magnetisierung des Lichtes und Bestimmung des Verhältnisses m/e bei der Strahlung 105

12. Zunahme der Trägheit infolge schneller Bewegung . . 110

13. Berechtigung der elektrischen Theorie der Trägheit . 117
Beweis für die rein elektrische Natur der Trägheit der vom Radium fortgeschleuderten β-Teilchen 119

14. Messung der Geschwindigkeit und der Masse der Teilchen zusammengesetzter Strahlen vermittelst der Methode der elektrischen und magnetischen Ablenkungen . . 123
Apparat von Kaufmann 125

15. Elektrische Theorie der Materie 132

16. Elektrische Theorie der Materie (Fortsetzung) 137
Natur der Kohäsion 137
Über chemische und Molekularkräfte 137
Molekularkräfte. Kohäsion 139

17. Weitere Betrachtungen über die Struktur des Atoms . 144

Kapitel Seite

18. Andere Konsequenzen der Elektronentheorie 147
Radioaktivität 147
Sonnenkorona, magnetische Gewitter und Nordlichter . . 151
Umwandlungen von Radium 152
Emanationen 154
Ablenkung der α-Strahlen 154
Aktivität des Radiums bei allen Temperaturen 156
Spektrum des Radiums 157
Erzeugung von Elektrizität 158
Radioaktivität gewöhnlicher Substanzen 160
Analogie mit „Bevölkerung“ 162

19. Strahlung von einem Elektronenring und ihre Bedeutung für die Konstitution des Atoms 164
Unbeständigkeit des Atoms 166
Kosmische Analogie 167
Andere Erklärung der Unbeständigkeit der Atome . . . 168
Elektrische Theorie der Materie 169

20. Schwierigkeiten in der elektrischen Theorie der Materie 170
1. Die Entstehung der Spektrallinien 170
2. Versuch, die Anzahl der Korpuskeln in einem Atom zu bestimmen 173

21. Giltigkeit älterer Ansichten über elektrische Erscheinungen 176
Anzahl der Ionen in Leitern 179
Schluß 180

Anhänge.

A. Berechnung der Trägheit einer elektrischen Ladung 184
B. Das durch einen bewegten Magnet erzeugte elektrische Feld . 186
C. Über Elektrizität, Gravitation und Dimensionen 188
D. Dimensionen des Verhältnisses e/m 189
E. Elektrische Sättigung etc. 190
F. Gestalt der Bahn eines strahlenden Elektrons 191
G. Das Strahlungsvermögen eines umlaufenden Elektrons 191
H. Faradays prophetische Nomenklatur 193
I. Über die β-Strahlen des Radiums 195
K. Bemerkung über das Verhalten einer Ladung, die sich nahezu mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt 196
L. Deformation Infolge schneller Bewegung durch den Äther . . 200
M. Konstitution der Elektronen 201

Einleitung.

In Maxwells *Electricity*, die im Jahre 1873 erschien, findet sich im 57. Abschnitt, wo von der Entladung der Elektrizität durch Gase, namentlich durch verdünnte Gase, die Rede ist, der folgende Satz:

„Diese und viele andere Erscheinungen der elektrischen Entladung sind sehr wichtig, und wenn sie besser verstanden werden, so werden sie wahrscheinlich viel Licht über die Natur der Elektrizität sowie über die Natur der Gase und des den Raum erfüllenden Mediums verbreiten".

Diese Prophezeiung ist durch den Fortschritt der Wissenschaft reichlich in Erfüllung gegangen, und ohne Zweifel sind noch weitere Fortschritte in dieser Richtung zu erwarten. Zunächst das Studium der Leitung durch Flüssigkeiten und sodann das Studium der Leitung durch Gase, in Verbindung mit dem Studium der Strahlungserscheinungen, hat in den letzten Jahren unsere Kenntnisse bedeutend erweitert und ein neues Kapitel, ja einen neuen Band der Physik eröffnet.

Die Folge war, daß die Aufmerksamkeit auf die Erscheinungen der elektrischen Ladung konzentriert und die Wichtigkeit des Studiums der Elektrostatik in höherem Grade gewürdigt wurde. Unser verstorbener Freund Fitz Gerald pflegte scherzhaft die Elektrostatik als einen der schönsten und nutzlosesten Zweige der Naturwissenschaften zu bezeichnen, und bei den Lehrern, welche darauf bedacht waren, nur das praktisch Nützliche zu berücksichtigen, um nicht die Zeit ihrer Schüler mit überflüssigem, wenn auch dekorativem Beiwerk zu vergeuden, war es üblich

geworden, das Gebiet der Elektrostatik zu ignorieren oder nur flüchtig zu durcheilen und das Studium der Elektrizität mit den Erscheinungen des Stromes, namentlich mit dem Zusammenhang zwischen Elektrizität und Magnetismus zu beginnen.

Und vom rein praktischen Gesichtspunkt aus betrachtet sowie auch in mancher anderen Hinsicht ist dieser Teil der Elektrizitätslehre ohne Zweifel der wichtigste; allein für den, der nicht nur Dynamomaschinen entwerfen will, für den, der außer der praktischen Ausbildung als Techniker etwas von den Interessen, dem Instinkt und der Einsicht eines Mannes der Wissenschaft hat, für den bilden die Natur und die Eigenschaften einer elektrischen Ladung, in ruhendem sowie in bewegtem Zustand, ein fesselndes Studium; denn hier liegt der Schlüssel für die innere Bedeutung aller Vorgänge, mit denen sein Leben so eng verknüpft ist, hier liegt die Lösung von Problemen, die länger als ein Jahrhundert die Aufmerksamkeit und den Scharfsinn der Philosophen, Physiker und Chemiker in Anspruch genommen haben. Ja es handelt sich dabei indirekt um weit wichtigere und fundamentalere Dinge als die gewöhnlich als „elektrische“ bezeichneten; und wir können jetzt hoffen, unerwartete Antworten auf Fragen zu bekommen, die sich während der ganzen Geschichte der Zivilisation geboten haben. Probleme dieser Art haben Aufmerksamkeit und Interesse erregt, seit die Menschen anfingen, sich vom Kampf um das bloße Dasein freizumachen und sich mit Kunst, Literatur, Anhäufung von Reichtümern sowie mit philosophischer Spekulation, exakter Forschung und reiner Theorie zu beschäftigen. Diese Gruppe ist es, an die ich mich jetzt wende.

1. Kapitel.

Eigenschaften einer elektrischen Ladung.

Um zunächst eine rein theoretische Grundlage zu gewinnen, müssen wir die Eigenschaften der alten und lange bekannten Erscheinung betrachten, die man einen elektrisch geladenen Körper nennt.

Zwei Substanzen, welche mit einander in innige Berührung gebracht und dann getrennt werden, sind im allgemeinen mehr oder weniger dauernd durch Kraftlinien verbunden; dabei befindet sich der Zwischenraum zwischen ihnen in einem Zustand von Spannung in der Richtung der Linien und einem Zustand von Druck senkrecht zu der Richtung der Linien. Diese Linien haben Richtung und „Sinn", ihre beiden Enden sind nicht gleichartig; sie fangen auf dem einen Körper an und hören auf dem anderen auf, sie veranschaulichen ein Feld elektrostatischer Kraft und ihre Enden auf dem einen oder anderen der Körper bilden eine sogenannte elektrische Ladung. Die elektrischen Ladungen sind zweierlei Art, positiv und negativ; die ersteren entsprechen dem Anfang, die letzteren dem Ende der Linien. Mit den Körpern der einen Klasse, den sogenannten Isolatoren, sind die Linien anscheinend fest verbunden; eine Verschiebung oder Übertragung der Ladungen erfolgt in ihnen nur mit Heftigkeit, dagegen bewegen sich die Ladungen in Körpern einer anderen Klasse, den Leitern, mit Leichtigkeit und sie werden leicht von einem solchen Leiter auf einen anderen, der mit ihm in Berührung ist, übertragen.

Eine Spannung in den Linien strebt die Enden so nahe als möglich zusammenzubringen, und seitlich streben die Linien

sich gegenseitig abzustossen; dieses Bild genügt, um alle Erscheinungen elektrischer Anziehung und Abstoßung darzustellen.

Das durch die Linien veranschaulichte Kraftfeld kann ganz gut im luftleeren Raum existieren, aber die Linien enden niemals im luftleeren Raum; die Ladungen werden stets von Materie oder von etwas, was ihr äquivalent ist, getragen. Im luftleeren Raum kann ein solches Kraftfeld wahrscheinlich nur in der Weise zerstört werden, daß man sich die beiden Körper, welche die Ladungen besitzen, einander annähern läßt und so die Linien sich bis zum Verschwinden verkürzen läßt; aber auch dann werden die Ladungen wahrscheinlich nicht zerstört, sondern nur so nahe zusammengebracht, daß sie auf mäßige Entfernungen hin keine äußere Wirkung ausüben. Wenn dagegen Materie anwesend ist, so kann sie dieses Zusammenfallen der Linien in verschiedener Weise unterstützen und die verschiedenen Erscheinungen der Leitung und disruptiven Entladung hervorrufen.

Wenn einer der beiden entgegengesetzt geladenen Körper in eine verhältnismäßig große Entfernung gebracht wird, während der andere isoliert ist und für sich allein betrachtet wird, so sind die Kraftlinien des letzteren nahezu gerade Linien, die von ihm nach allen Richtungen hin ausgehen. Diese bilden also ein Bild für die einfache Vorstellung eines einzelnen geladenen Körpers. Es muß allerdings eine komplementäre Ladung existieren, d. h. die anderen Enden der Linien müssen irgendwo sein. Sie können aber so weit entfernt sein, daß man sie in den meisten Fällen geradezu als unendlich weit entfernt betrachten darf.

Allgemeine Bemerkung.

Dinge so zu behandeln, als ob sie sich in unendlicher Entfernung befänden, bietet durchaus keine Schwierigkeit, wie man wohl zuweilen annimmt. Man muß bedenken, daß diese Ausdrucksweise immer als eine Vereinfachung angewandt wird, wenn der Fall eintritt, daß von dem Einfluß der betreffenden Dinge abgesehen werden kann. Wenn dies nicht der Fall ist, so muß darauf Rücksicht genommen werden, daß sie sich in endlicher Entfernung befinden und ihre Lage muß genau angegeben

werden; hierdurch wird jedoch die Einfachheit der Vorstellungen und der Gleichungen beeinträchtigt. Wenn es aber nicht nötig ist, sie zu berücksichtigen oder wenn es gleichgültig ist, in welcher Lage sie sich befinden, so umgeht man eine genauere Bezeichnung ihrer Lage dadurch, daß man sie so behandelt, als ob sie sich in unendlicher Entfernung befänden, d. h. dadurch, daß man sie ignoriert. Ein solches Ignorieren ist zwar nicht immer, aber doch in den meisten Fällen zulässig.

Ladung in gleichförmiger Bewegung.

Es fragt sich nun, inwieweit dieses Kraftfeld dem Körper und inwieweit es dem Raum, d. h. dem den Körper umgebenden Äther angehört. Der Körper ist der Kern, von dem die Linien ausstrahlen, aber die Linien selbst, der Spannungszustand und andere Eigenschaften, die sie darstellen und veranschaulichen, gehören keineswegs zu dem Körper; in jedem Punkte des Raumes ist ein eigentümlicher Zustand des Äthers, der als elektrisches Potential bezeichnet wird, und dieses Potential ist etwas, was sich im Äther und nur im Äther befindet, wenn es auch seinen Ursprung in dem Körper hat und von diesem erhalten wird.

Man stelle sich einen solchen geladenen Körper, etwa eine Kugel, vor und nehme an, daß er seine Lage ändert; wie müssen wir uns den Einfluß der Bewegung auf sein Kraftfeld vorstellen? Es gibt wenige Dinge in der Physik, die sicherer sind als daß, wenn sich ein Körper fortbewegt, der Äther in seiner Umgebung nicht mitgerissen wird, als ob er im geringsten Grade zähflüssig sei.[1]) Der Äther als Ganzes, d. h. wenn er sich unbeeinflußt in seinem natürlichen Zustand befindet, ist stationär; er ist einer Deformation, aber nicht einer Bewegung fähig; er ist der Sitz von Potential, aber nicht von kinetischer Energie. Die einzige Bewegung, deren er möglicherweise fähig ist, ist von „nicht rotationsartigem“ Charakter, mit anderen Worten, er verhält sich wie eine vollkommene Flüssigkeit. Vielleicht besitzt er andere rotationsartige oder wirbelartige Bewegungen, aber wenn dies der

1) Lodge, *Phil. Trans.* 1893, S. 727, und besonders 1897, S. 149.

Fall ist, so können sie durch kein bekanntes Mittel zerstört und erzeugt werden und sind noch nicht entdeckt worden.

Die Wirkung der Bewegung des Körpers besteht also darin, daß sie die Deformation des Äthers an der einen Stelle aufhebt und sie an einer anderen Stelle erzeugt; der Zustand der Deformation geht *mit* dem Körper, aber *durch* den Äther.

Wenn wir die Sache vom Standpunkt des Äthers aus betrachten, so können wir sagen, daß das Kraftfeld, wenn sich der Körper bewegt, fortwährend zerstört und regeneriert wird. Betrachten wir sie vom Standpunkt des bewegten Körpers aus, so müssen wir sagen, daß er sein Feld mit sich fortführt.

Es entsteht nun die Frage — und es ist durchaus keine leichte Frage — was in dem Äther vor sich geht, wenn dieses Verschwinden und Wiederentstehen eines elektrostatischen Feldes stattfindet oder wenn sich ein Kraftfeld durch ihn hindurchbewegt. Kann es sich momentan den neuen Bedingungen anpassen oder ist dazu Zeit erforderlich? Diese Frage ist von Oliver Heaviside eingehend und erschöpfend studiert worden.

Richten wir die Aufmerksamkeit auf einen Punkt, der von dem Körper eine Meile entfernt ist; erreicht die Nachricht über die Bewegung des Körpers diesen Punkt momentan, so daß sich die sämtlichen Kraftlinien wie absolut starre Speichen in allen Teilen gleichzeitig bewegen? Wenn ja, wie wird die Mitteilung befördert, so daß die entfernten Teile des Mediums momentan beeinflußt werden können? Oder kommt die Störung an dem entfernten Punkt erst nach Verlauf einer, wenn auch kurzen, doch merklichen Zeit an, mit anderen Worten, findet eine Anpassung an die neuen Bedingungen statt, eine Anpassung, welche die näheren Teile früher und die entfernteren Teile später erreicht; und wenn ja, welche weiteren Erscheinungen sind während der Übergangsperiode zu beobachten?

Die Antwort ist die, daß während der Bewegung des geladenen Körpers, und selbst nachdem seine Bewegung aufgehört hat — bis die Störung verschwunden und alles in den statischen Zustand zurückgekehrt ist — die Erscheinungen des *Magnetismus* auftreten. Eine neue Gruppe von Kraftlinien, die von den elektrostatischen Linien ganz verschieden sind (obschon auch sie eine Spannung in ihrer Richtung und einen Druck senk-

recht zu ihrer Richtung zeigen), tritt vorübergehend auf. Diese Linien entspringen nicht an einer Stelle und enden an einer anderen, wie die elektrischen, sondern sie bilden immer und notwendigerweise geschlossene Kurven oder Ringe, und in dem vorliegenden einfachsten Falle sind sie Kreise, deren Mittelpunkte sämtlich auf dem von dem geladenen Körper beschriebenen Wege liegen. In jedem Punkte des Raumes sind jetzt drei Richtungen zu betrachten, 1. die ursprüngliche Richtung des elektrostatischen Feldes (die ursprünglichen elektrischen Kraftlinien); 2. die Richtung der Bewegung, d. h. eine Richtung parallel zur Bewegung der geladenen Kugel, und 3. die Richtung senkrecht zu diesen beiden Richtungen; diese letztere ist die Richtung der magnetischen Kraftlinien, d. h. die Richtung des magnetischen Feldes.

Ich sprach vom magnetischen Feld als von etwas vorübergehend existierenden, aber dies gilt nur unter der Annahme, daß der geladene Körper nur verschoben, nur von einer Stelle an eine andere gebracht wird; wenn er nicht angehalten, sondern in Bewegung gehalten wird, so bestehen auch die magnetischen Linien ebensolange wie die Bewegung anhält. Die Stärke des magnetischen Feldes in irgend einem Punkte ist in Polarkoordinaten

$$H = \frac{e\,u}{r^2} \sin \vartheta.$$

Fragt man, ob ein solches magnetisches Feld schwach ist oder nicht, so habe ich zu antworten, daß dies ausschließlich davon abhängt, wie stark die Ladung ist und wie schnell sie sich bewegt. Ein magnetisches Feld anderer Art ist nach meiner Ansicht nicht möglich; und wenn wir also ein magnetisches Feld antreffen, welches wir als „stark" bezeichnen zu dürfen glauben, so müssen wir annehmen, daß es mit der Bewegung einer sehr beträchtlichen Ladung zusammenhängt, deren Geschwindigkeit wir als eine große bezeichnen dürfen. Für jede Kugel von gewöhnlicher Ladung und gewöhnlicher Geschwindigkeit — sei es selbst eine von einem Geschütz abgefeuerte Kanonenkugel — ist das konzentrisch-kreisförmige magnetische Feld, welches ihre Bahn umgibt, allerdings entschieden schwach. Aber einerlei ob es schwach ist oder nicht, es ist jedenfalls da, und um sein Dasein

zu erklären, müssen wir alle magnetischen Erscheinungen des elektrischen Stromes erforschen.

Denn ebenso wie es kein anderes elektrostatisches Feld gibt außer demjenigen, welches sich von einem geladenen Körper bis zu einem anderen erstreckt, gibt es auch keinen anderen elektrischen Strom als die Bewegung eines solchen geladenen Körpers und kein anderes magnetisches Feld als dasjenige, welches die Bahn seiner Bewegung umgibt.

Die Fortbewegung einer elektrischen Ladung *ist* ein elektrischer Strom, und man nimmt an, daß das magnetische Feld, welches diesen Strom umgibt, die einzige Art eines magnetischen Feldes ist, welche existiert. Wenn irgend eine andere Art möglich ist, so ist es Sache derjenigen, die dies behaupten, den Beweis für ihre Behauptung zu erbringen.

Energieübertragung.

Solange die Ladung stationär ist, ist alles in Ruhe, und wir haben nur ein elektrisches Feld.

Wenn sich die Ladung mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt, so ist der Strom konstant, und wir haben ein ruhendes magnetisches Feld und zugleich an derselben Stelle ein in gleichförmiger Bewegung befindliches elektrisches Feld; auch findet in der Richtung der Bewegung eine gewisse Energieübertragung statt.

Dies ist ein besonderer Fall des sogenannten Poyntingschen Theorems, welches besagt, daß da, wo zugleich ein elektrisches und ein magnetisches Feld ist, kein statisches Gleichgewicht sein kann, sondern Energie durch das Medium fließen muß; und die Geschwindigkeit der Energieübertragung — der Betrag, welcher pro Sekunde durch die Flächeneinheit geht — ist gleich dem $\frac{1}{4\pi}$-fachen des Vektorproduktes der Intensität der beiden Felder, d. h. es wird durch die Fläche des Parallelogramms gemessen, das durch die Linien begrenzt wird, welche die beiden Felder nach Größe und Richtung repräsentieren, eine Größe, die gewöhnlich durch

$$V(EH) \text{ oder } [\mathbf{EH}] \text{ oder } EH \sin \vartheta$$

bezeichnet wird, wobei ϑ den Winkel zwischen E und H bedeutet.

Die Fortpflanzungsrichtung der Energie steht auf der Ebene dieses Parallelogramms senkrecht und der „Sinn“ oder das Vorzeichen derselben hängt von dem Sinn der beiden Felder ab. Wenn beide umgekehrt würden, so würde der Sinn der Energieübertragung unverändert bleiben; und der Betrag derselben bleibt konstant, solange die Felder konstant sind, d. h. solange der Strom gleichförmig ist. Eine andere Weise, die Tatsachen auszudrücken, ist die, daß man sagt, daß der Raum, in welchem zwei Felder superponiert sind, mit Bewegungsgröße angefüllt ist; und das Moment der Bewegungsgröße für einen Pol m und eine Ladung e ist einfach em.

Beschleunigte Ladung.

Noch ein weiterer Satz:

Bis dahin haben wir nur den Fall gleichförmiger Ruhe und gleichförmiger Bewegung in Betracht gezogen; aber wie verhält es sich mit den Übergangsstadien des Anfangens und Aufhörens? Wie liegen die Verhältnisse, wenn die Ladung angefangen hat sich zu bewegen, aber bevor sie eine konstante Geschwindigkeit angenommen hat, und dann wieder, wenn die Bremse angezogen wird und die Geschwindigkeit abnimmt, oder wenn sich die Richtung der Bewegung ändert? Welche Erscheinungen sind zu beobachten, wenn die Geschwindigkeit eine Beschleunigung oder eine Verzögerung oder wenn die Bahn eine Krümmung erleidet? In diesem Falle wird etwas mehr als einfache Elektrostatik und einfacher Magnetismus beobachtet.

Wenn nämlich ein Leiter durch ein magnetisches Feld bewegt wird, so wirkt bekanntlich in diesem Leiter eine elektromotorische Kraft, deren Größe gleich der Geschwindigkeit ist, mit der die magnetischen Kraftlinien geschnitten werden, oder in Symbolen

$$E = -dN/dt,$$

was die fundamentale „Dynamo“-Gleichung ist. Dies ist die Erscheinung der sogenannten magneto-elektrischeu Induktion; es ist die von Faraday entdeckte elektromotorische Kraft, die notwendigerweise immer auftritt, wenn Magnetismus und relative Bewegung superponiert sind.

Sie ist indessen ganz unabhängig von dem Leitungsvermögen des Leiters und würde denselben Wert haben, wenn die Bewegung in einem Isolator stattfände; allerdings könnte sie in diesem Fall nicht dieselbe Wirkung hervorbringen, was Leitungsströme betrifft.

Die Wirkung eines Leiters besteht darin, daß er die in sämtlichen Elementen seiner Länge erzeugten elektromotorischen Kräfte integriert oder summiert; diese Wirkung tritt besonders deutlich hervor, wenn der Leiter sehr lang und kompakt aufgewickelt ist (wie in einer Armatur). Die elektromotorische Kraft zwischen zwei Punkten A und B oder in einer geschlossenen Strombahn wird als das Linienintegral des elektrischen Feldes von A bis B oder um die geschlossene Strombahn herum definiert. Wenn die Bahn nicht geschlossen ist, so wird es durch die Differenz des elektrischen Potentials zwischen A und B gemessen.

Eins der leichtesten und gewöhnlichsten Mittel, Bewegung und Magnetismus zu superponieren, besteht darin, daß man die Stärke eines magnetischen Feldes (wie in einem Ruhmkorffschen Apparat) ab- und zunehmen läßt; dann bewegen sich nämlich die Kraftlinien senkrecht zu ihrer Längsrichtung, indem sie sich je nach Umständen mehr ausbreiten oder zusammenziehen, und so bekommen wir sofort die Erscheinung der *Induktion,* d. h. es entsteht eine induzierte E. M. K., deren Wert in jedem Punkt gleich der Geschwindigkeit der Änderung der magnetischen Kraftlinien in diesem Punkt ist. Dies findet in allen Fällen statt, wenn eine elektrische Ladung beschleunigt wird; denn dann ändert sich notwendigerweise die Stärke ihres magnetischen Feldes, welches, wie wir gesehen haben, von der Geschwindigkeit abhängt, und so wird eine E. M. K. induziert. Da kein Leiter vorhanden ist, so erzeugt diese E. M. K. keinen Strom, aber sie repräsentiert eine elektrische Kraft, welche vorher nicht da war, und die neue Kraft hat eine neue Richtung; die Richtung einer induzierten elektrischen Kraft steht senkrecht auf der Richtung, in welcher sich die entstehenden magnetischen Linien bewegen, im vorliegendeu Falle von der Ladung nach außen. Folglich fällt die Richtung der neuen oder induzierten E. M. K. mit der Bewegungsrichtung zusammen, ist aber dem Sinne nach jeder Änderung in dieser letzteren entgegengesetzt, und der Effekt der Superponierung

dieser neuen E. M. K. über das bereits vorhandene magnetische Feld besteht in einer geringen Energieübertragung in radialer Richtung von der beschleunigten Ladung hinweg. Etwas Energie fliegt daher mit der Geschwindigkeit des Lichtes fort; und wenn es auch in gewöhnlichen Fällen ein äußerst geringer Betrag sein mag, welcher so in den Raum ausgestrahlt wird, so ist es doch die einzige Art, wie die Strahlung, mit der wir bekannt sind, entstehen kann.

Eine elektrische Entladung während der Dauer ihrer Beschleunigung oder Verzögerung ist es, von der wir die als *Strahlung* bezeichnete Erscheinung erhalten; dies und nichts anderes als dies ist es, was Ätherwellen erregt und uns die verschiedenen Varietäten von *Licht* gibt.

Die pro Sekunde ausgestrahlte Energie ist, wie Larmor gezeigt hat,

$$\frac{2\,\mu\,e^2\,\dot{u}^2}{3\,v},$$

wenn v die Lichtgeschwindigkeit ist und $\dot{u}$ die Beschleunigung der Ladung e.

In dieser Weise, wenn auch natürlich durch eine ausgedehnte Entwickelung dieser Grundvorstellungen, sind alle Erscheinungen der Elektrizität, des Magnetismus und der Optik zusammengefaßt und sozusagen erklärt.

Anmerkung.

Es mag hier ein für allemal gesagt werden, daß in jedem Fall die eine oder die andere der beiden Ätherkonstanten μ und $\varkappa$, da wo sie vorkommt, ausdrücklich bezeichnet werden muß. Wenn dies nicht geschieht, so sind die Dimensionen der meisten Ausdrücke notwendigerweise falsch, und es muß jedesmal ausdrücklich mit Worten gesagt werden, ob C. G. S. Einheiten oder Einheiten eines anderen Systems, ebenso, ob elektrostatische oder etektromagnetische Einheiten gemeint sind. Dieses letztere doppelte Maßsystem hat seinen Dienst getan und tut ihn noch, aber eigentlich verwirrt es die ganze Sache, und es ist nur deshalb notwendig geworden, weil wir die Werte von μ und $\varkappa$ noch nicht kennen, ja selbst über die Natur dieser Größen noch im unklaren sind. Hoffentlich wird kein ernsthafter Versuch gemacht, durch Aufstellung eines dritten Systems die Verwirrung zu beseitigen, da ein solcher Versuch nur eine Vergrößerung der Verwirrung zur Folge haben würde.

Bei der ausdrücklichen Bezeichnung der Konstanten ist alles klar und leicht verständlich. Der soeben angeführte Ausdruck ist z. B. wirklich das, was er sein soll, eine Energie dividiert durch eine Zeit,

$$\left[\frac{FL}{T}\right]$$

und ist daher in jedem beliebigen System von Einheiten richtig. Ebenso ist auch der am Anfang des nächsten Kapitels angeführte Ausdruck wirklich das, was er sein soll, nämlich eine Masse oder Trägheit; und dasselbe kann von allen anderen Ausdrücken in diesem Buch gesagt werden.

Für die numerische Berechnung spezieller Fälle ist es allgemein gebräuchlich, für elektromagnetische C.-G.-S.-Einheiten $\mu = 1$ und für elektrostatische Einheiten $\varkappa = 1$ zu setzen, und dieses Übereinkommen muß beibehalten werden, bis wir durch zukünftige Entdeckung die wirklichen Tatsachen kennen lernen. Der fortgesetzte Gebrauch dieser unbekannten Konstanten ist aber ohne Zweifel geeignet, für diese Entdeckung den Weg zu ebnen.

2. Kapitel.

Elektrische Trägheit.

Was auch eine Ladung sein mag und was die physikalische Konstitution des Äthers sein mag, jedenfalls muß er das Bestehen sowohl der elektrischen, als der magnetischen Linien für sich allein, sowie die Übertragung von Energie ermöglichen, wo beide Gruppen von Linien koexistieren und sich einander kreuzen.

Eine beschleunigte Ladung ist äquivalent einem veränderlichen Strom, da statt dC/dt auch d^2e/dt geschrieben werden kann. Wenn sich ein Strom ändert, so wird bekanntlich eine E. M. K. der Selbstinduktion gleich $L\,dC/dt$ erregt; und diese elektrische Gleichung $E = L\ddot{e}$ entspricht der mechanischen Gleichung $F = m\ddot{x}$, dem zweiten Newtonschen Gesetz.

Wenn man den Strom als eine in Bewegung befindliche Ladung auffaßt, so entspricht diese selbstinduzierte oder *Reaktions*-E.-M.-K. einer Massenbeschleunigung. Und der elektrischen Beschleunigung wirkt die E. M. K. entgegen, ebenso wie der Beschleunigung der Materie ihre mechanische Trägheit entgegenwirkt. Der Koeffizient der elektrischen Beschleunigung — gewöhnlich mit L bezeichnet — repräsentiert daher ein Trägheitsglied und wird passend als „elektrische Trägheit" bezeichnet.

Nach dem Lenzschen Gesetz besteht die Wirkung der Induktion immer darin, daß sie der Ursache, welche sie erzeugt, entgegenwirkt. In vorliegendem Falle ist die „Ursache" die Beschleunigung oder die Verzögerung der in Bewegung befindlichen Ladung, und so wirkt in jedem Fall dieser Bewegung die Reaktion der durch sie erzeugten magnetischen Linien entgegen.

Die elektrische Trägheit wirkt den Bewegungen entgegen, wenn die Geschwindigkeit zunimmt, dagegen wirkt sie im Sinne

der Bewegung, wenn die Geschwindigkeit abnimmt. Die Wirkung ist also der Wirkung der gewöhnlichen mechanischen Trägheit vollkommen analog. Es ist also Kraft erforderlich und muß Arbeit getan werden, um einen geladenen Körper in Bewegung zu setzen oder seine Bewegung zu hemmen. Diese Kraft ist eine *Extrakraft,* welche erforderlich ist, weil der Körper geladen ist. Welche gewöhnliche Trägheit ein Körper auch, als ein Stück Materie betrachtet, haben mag, er hat noch ein wenig mehr, weil er mit Elektrizität geladen ist, einerlei ob mit positiver oder mit negativer.

Der Wert dieser elektrischen Trägheit wurde 1881 von J. J. Thomson für eine geladene Kugel vom Radius a berechnet; er ist gleich

$$\frac{2\,\mu e^2}{3a}.$$

Elektrische Trägheit oder Masse; Fortsetzung.

Da dies von großer Wichtigkeit ist, wiederhole ich:

Ebenso wie ein veränderliches magnetisches Feld eine elektrostatische Ladung beeinflußt, — d. h. ein schwaches Feld elektrostatischer Kraft erzeugt, dessen Intensität durch eine Formel ausgedrückt wird, die im Nenner das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit enthält (s. Lodge, *Phil. Mag.*, Juni 1889, S. 472) — so ist es auch mit einem veränderlichen elektrischen Feld; es erzeugt ein magnetisches Feld, welches der Geschwindigkeit seiner Änderung proportional ist. Und das magnetische Feld selbst ändert sich, wenn es beschleunigt wird, und in diesem Falle erzeugt es eine E. M. K., die auf die in beschleunigter Bewegung begriffene Ladung zurückwirkt — immer so, daß sie ihrer Bewegung entgegenwirkt — nach dem sogenannten Lenzschen Gesetz oder einfach nach dem Gesetz der Erhaltung der Energie; denn wenn sie die Bewegung beförderte, so würden sich Wirkung und Gegenwirkung gegenseitig ohne Ende bis auf jeden beliebigen Grad der Intensität verstärken.

Die durch einen zunehmenden Strom, d. h. durch einen positiv beschleunigten geladenen Körper erzeugten magnetischen Linien wirken auf die Bewegung, welche sie erzeugte, in einer

Weise zurück, daß sie diese zu hemmen streben, und zwar aktiv oder elastisch, nicht passiv oder träge wie durch Reibung. Die Reaktion hört auf, sobald die Bewegeng gleichförmig wird. Sie ist daher nicht der Reibung, sondern der Trägheit analog, sie ist der Koeffizient eines Beschleunigungsfaktors.

Die durch einen abnehmenden Strom, d. h. durch einen negativ beschleunigten oder verzögerten geladenen Körper erzeugten magnetischen Linien wirken entgegengesetzt und streben die Bewegung zu erhalten; wir haben also auch hier einen der Trägheit entsprechenden Faktor. Und man kann sagen, der geladene Körper habe, während er in Bewegung ist, eine besondere Bewegungsgröße deshalb, weil er geladen ist. Der Wert der Bewegungsgröße ist der Geschwindigkeit proportional, solange die Geschwindigkeit nicht übermäßig groß ist, und infolgedessen ist unter derselben Einschränkung der Trägheitsfaktor konstant, d. h. unabhängig von der Geschwindigkeit. Man kann daher auch annehmen, daß er vorhanden ist, wenn die Ladung stationär ist, und er imitiert daher genau die bekannte mechanische Trägheit eines Stückes gewöhnlicher Materie.

Im Anhang A ist die einfachste Form der hier angedeuteten quantitativen Beziehungen gegeben, und die von einer elektrischen Ladung herrührende Trägheit ist hier berechnet. Es ist wohl zu beachten, daß, welche Trägheit eine materielle Kugel als Materie betrachtet auch besitzen mag, sie mehr besitzt, wenn sie mit Elektrizität geladen ist, und zwar einerlei ob die Ladung positiv oder negativ ist. Der Betrag dieser Extraträgheit oder elektrischen Trägheit ist proportional der elektrostatischen Energie der Ladung, d. h. sie ist proportional der Ladung und zugleich ihrem Potentional. Wenn die Ladung e und der Radius der Kugel a ist, so ist das Potential $e/\varkappa a$ ($\varkappa$ ist die Faradaysche Dielektrizitätskonstante); und die zugehörige Trägheit ist

$$m = \frac{2}{3\,v^2}\, e.\frac{e}{\varkappa\, a}$$

wenn v die Lichtgeschwindigkeit ist. (S. die Bemerkung am Ende vom 1. Kapitel.)

Dies kann man auch so ausdrücken, daß man sagt, wenn sich eine wirkliche Masse von diesem Betrage mit der Lichtge-

schwindigkeit bewegte, so würde ihre kinetische Energie um die Hälfte größer sein als die potentielle Energie der elektrischen Ladung, diese der Masse mechanisch äquivalent gerechnet; denn

$$\frac{3}{4} m v^2 = \frac{1}{2} e. \frac{e}{\varkappa a} = \frac{1}{2} \textit{Ladung} \times \textit{Potential} = \textit{potentielle Energie.}$$

Nun muß aber selbst eine so geringe Quantität Materie wie z. B. ein Milligramm, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, eine riesige Energie besitzen, denn unter der gewöhnlichen Annahme, daß die Masse vollkommen konstant ist, würde die Energie eines Milligramms, welches sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, nicht weniger als fünfzehn Fußtonnen betragen, oder wie es Sir William Crookes ausgedrückt hat, ein Gramm Materie, welches sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, würde genug Energie besitzen, um die britische Flotte auf den Gipfel des Ben Nevis heben zu können.

Folglich muß die Energie jeder gewöhnlichen Quantität elektrischer Ladung äußerst gering sein. Trotzdem ist es sehr zweifelhaft, ob irgend eine andere Art von Trägheit existiert oder nicht. Diese Frage ist streng genommen gegenwärtig eine offene.

Wirkung der Konzentration.

Das einzige Mittel, einer gegebenen elektrischen Ladung eine merkliche Masse zu erteilen, besteht darin, daß man ihr Potential ungemein hoch macht, d. h. daß man sie auf eine sehr kleine Kugel konzentriert.

Ein Coulomb auf dem Potential von einem Volt hat eine elektrostatische Energie von einem halben Joule, d. h. $\frac{1}{2} \times 10^7$ Erg.

Die äquivalente Masse würde sein

$$\frac{2}{3} \frac{10^7}{9 \times 10^{20}} = \frac{2}{27} \times 10^{-13} \text{ Gramm} = 10^{-8} \text{ Milligramm.}$$

Selbst wenn man das Potential auf eine Million Volt erhöht, würde das Massenäquivalent eines Coulomb bei diesem Potential der hundertste Teil eines Milligramms, also immer noch kaum merklich sein.

Die Ladung eines Atoms, wie man sie bei der Elektrolyse beobachtet, ist gleich 10^{-10} elektrostatischen Einheiten [1]). Wenn diese auf eine Kugel von der mutmaßlichen Größe eines Atoms, d. h. eine Kugel von 10^{-8} Zentimeter Radius gleichmäßig verteilt wäre, so würde ihr Potential ein Hundertstel einer elektrostatischen Einheit oder ungefähr 3 Volt sein. Die Energie einer solchen Ladung würde 10^{-12} sein, und die Trägheit eines Körpers, der diese Energie besitzen würde, wenn er sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegte, würde 10^{-33} Gramm sein; dies würde daher seine elektrische Trägheit oder Extramasse sein.

Dies ist aber unvergleichlich weniger als die Masse eines Wasserstoffatoms, die ungefähr 10^{-25} Gramm ist. Infolgedessen würde die Ionenladung, gleichförmig über ein Atom verteilt, keinen nennenswertigen Bruchteil zu seiner anscheinenden Masse hinzufügen.

Wenn aber die Atomladung in eine Kugel von der Dimension 10^{-13} Zentimeter konzentriert wäre, so würde ihr Potential 1000 elektrostatische Einheiten oder 300,000 Volt sein; ihre Energie würde dann 10^{-7} Erg. und ihre Trägheit 10^{-28} Gramm oder ungefähr $\frac{1}{1000}$ der Masse eines Wasserstoffatoms sein.

Rückblik.

Dies alles sind unbestreitbare Tatsachen, d. h. Tatsachen, die sich aus der allgemein angenommenen Theorie der Elektrizität ergeben, einerlei ob Dinge wie Elektronen existieren oder nicht.

Alles Gesagte ist richtig für eine gewöhnliche Ladung einer gewöhnlichen Kugel, die durch mechanische Kraft in Bewegung gesetzt werden kann.

Sie gibt uns die Erscheinungen der Elektrostatik, wenn sie in Ruhe ist, des Magnetismus, wenn sie in Bewegung ist, der Strahlung, wenn ihre Bewegung verändert wird, und sie zeigt gelegentlich, wegen der bekannten Gesetze der elektromagnetischen Induktion, eine Art Trägheit, also eine der fundamentalsten Eigenschaften der Materie.

Ich will einige hiermit in engem Zusammenhang stehende Sätze hinzufügen, welche später Anwendung finden werden:

---

1) Nach Cambridger Messungen genauer $3{,}3 \times 10^{-10}$.

Man lasse eine hinreichend starke E. M. K. auf eine geladene Kugel wirken, und die Ladung kann von ihr weggerissen werden.

Man bringe ein Hindernis in den Weg der geladenen Kugel, die sich mit riesiger Geschwindigkeit bewegt, so daß sie mit *hinreichender* Plötzlichkeit mechanisch zur Ruhe gebracht wird, und es ist ebenfalls möglich, daß die Ladung oder etwas ähnliches von der Kugel hinweggeschleudert wird. Wenn dies geschehen soll, muß allerdings die Geschwindigkeit der materiellen Kugel eine riesige sein. Gewöhnlich wird die Ladung nur in Schwingung versetzt, wenn die Kugel plötzlich angehalten wird; und sie sendet dann eine einzelne Welle oder Kugelschale aus, deren Dicke gleich dem Durchmesser der Kugel oder um soviel größer als dieser ist, wie sich die Kugel während der Verzögerung bewegt hat. Wenn dagegen die Beschleunigung eine mäßige ist, so ist die Strahlung weniger energisch und auch weniger intensiv; weniger energisch, weil ihre Energie vom Quadrat der Beschleunigung abhängt, weniger intensiv, weil sie über eine dickere Ätherschale ausgebreitet ist. Röntgenstrahlen sind nur dann wahrnehmbar, wenn die Geschwindigkeit groß war und die Hemmung so plötzlich, daß die Pulswelle fest und dünn ist (siehe 3. Kapitel). Je dünner die Pulswellen sind, desto durchdringender sind sie. Wenn sie dünn genug sind, so können sie Materie durchdringen, ohne sie zu beeinflussen oder von ihr beeinflußt zu werden.

Historische Bemerkungen.

Die Lehre von dem Verhalten einer in Bewegung befindlichen geladenen Kugel sowie die Berechnung des Wertes der scheinbaren Trägheit einer elektrischen Ladung wurde von Professor J. J. Thomson in einer epochemachenden Abhandlung begonnen, die im *Philosophical Magazine* vom April 1881 erschien, einer der bemerkenswertesten physikalischen Abhandlungen unserer Zeit.

Den Anstoß zu diesen Untersuchungen gaben jene glänzenden Versuche von Crookes, die in den *Philosophical Transactions* für 1879 veröffentlicht wurden, denen Beobachtungen von Plücker und Hittorf vorausgegangen waren und die mit andern, zu derselben Zeit ausgeführten Beobachtungen von Goldstein, Spottiswood und Moulton in Zusammenhang standen.

Im Jahre 1891 war Sir William Crookes Präsident der Institution of Electrical Engineers, und in seiner Antrittsrede sprach er über einige dieser glänzenden Experimentaluntersuchungen, zu denen Schuster und andere beigetragen hatten. Es ist nicht zu viel gesagt, daß bis zur Zeit von Crookes die Erscheinungen der Vakuumröhren trotz vieler in England und auf dem Kontinent ausgeführten mühsamen und sorgfältigen Untersuchungen in Dunkel gehüllt waren, daß aber seit den Untersuchungen von Crookes in den siebziger Jahren die theoretische Aufklärung der Erscheinungen der Vakuumröhre stetig zugenommen hat, so daß sie jetzt, wie Maxwell vorausgesagt hatte, über das ganze Gebiet der Elektrizitätslehre, ja selbst über die Konstitution der Materie Licht verbreitet.

---

3. Kapitel.

Die Anfänge der atomistischen Theorie der Elektrizität.

Soweit haben wir uns mit den Grundgesetzen der Elektrizität im Allgemeinen beschäftigt. Es ist jetzt Zeit, die Möglichkeit eines atomistischen oder molekularen Zustandes zu betrachten, in dem sie mit materiellen Atomen verbunden ist.

In der ersten Auflage (1873) des großen Werkes von Clerk Maxwell finden wir auf S. 312 in dem Kapitel über Elektrolyse den folgenden Satz:

„Nehmen Sie jedoch an, daß wir uns über diese Schwierigkeit hinwegsetzen, indem wir einfach die Tatsache des konstanten Wertes der Molekularladung aussprechen, und daß wir diese konstante Molekularladung der Einfachheit halber ein Molekül Elektrizität nennen." . . .

So hatte sich genialen Männern schon lange vorher durch die Tatsachen der Elektrolyse und die Kenntnis der Faradayschen Gesetze die Idee einer atomistischen Natur der Elektrizität aufgedrängt. Allein Maxwell fährt nach einigen weiteren Paragraphen fort:

„Es ist höchst unwahrscheinlich, daß, wenn wir dazu kommen, die wahre Natur der Elektrolyse zu verstehen, wir die Theorie der Molekularladungen in irgend einer Form beibehalten werden, denn dann werden wir eine sichere Grundlage bekommen haben, auf der wir eine richtige Theorie der elektrischen Ströme aufbauen und uns so von diesen provisorischen Theorien unabhängig machen können."

Es ist übereilt, die Entwickelung der Dinge vorauszusagen, und der gegenwärtige Zustand der Elektrizitätslehre ist für die letztere Voraussage Maxwells nicht günstig. Die Theorie der

Molekularladung steht heute so sehr im Vordergrund und hat eine so bestimmte Gestalt angenommen, daß Maxwell seine Freude daran haben würde, zumal er selbst den Anstoß zu dieser Entwickelung gegeben hat.

Die elektrische Ladungseinheit, die Ladung eines einwertigen Atoms bei der Elektrolyse, was sie auch sein mag, ist eine natürliche Elektrizitätseinheit, von der wir Vielfache, aber soviel wir wissen, keine Bruchteile haben können.

Ich will den folgenden Satz aus § 32 meines Buches *„Modern Views of Electricity"* (1889. Siehe auch *Brit. Assoc.* Aberdeen, 1885, p. 763) zitieren:

> „Diese Menge, die Ladung eines einwertigen Atoms, ist die kleinste Elektrizitätsmenge, welche wir kennen, und sie ist eine wahre natürliche Einheit. Dies ist offenbar eine Tatsache von der größten Bedeutung. Diese Einheit, die kleinste Menge, welche man kennt, ist sogar als ein „Atom Elektrizität" bezeichnet worden, und vielleicht hat diese Bezeichnung eine gewisse Bedeutung. . . . Diese natürliche Elektrizitätseinheit ist äusserst klein, nämlich ungefähr gleich dem hunderttausendmillionsten Teil einer gewöhnlichen elektrostatischen Einheit oder weniger als der hundertmillionste Teil eines Coulomb".

Das Atom mit seiner Ladung, heißt ein „Ion". Die Ladung für sich allein betrachtet, ohne Rücksicht auf ihr Atom, wurde von Dr. Johnstone Stoney, „Elektron" oder natürliche Elektrizitätseinheit genannt.

Was wir aus der Elektrolyse sehr genau kennen lernen, ist das Verhältnis der Ladung zur Masse von Substanz, mit der sie verbunden ist. Es ist gleichgültig, wieviel Substanz gewählt wird, ob 100 Atome oder ein Atom, ob ein Atom oder ein Gramm oder eine Tonne. Die Elektrizitätsmenge, welche bei der Elektrolyse mit der Masse verbunden ist und frei wird, wenn die Substanz zersetzt wird, wächst in demselben Verhältnis; das Verhältnis ist für jedes Material konstant und wenn es für eins bestimmt ist, so ist er für alle bekannt.

Dieses Verhältnis ist der reziproke Wert des sogenannten „elektrochemischen Aequivalents" der Substanz. Im Lichte der Faradayschen Gesetze ist diese Grösse, wenn sie für eine Substanz gemessen ist, für alle bekannt, da die Ladung für alle

Atome dieselbe oder ein einfaches Vielfaches ist; um dann die elektrochemischen Aequivalente im einzelnen angeben zu können, braucht man nur das Atomgewicht oder Verbindungsgewicht der Substanz zu kennen. So ist das elektrochemische Aequivalent des Sauerstoffs das 8-fache von dem des Wasserstoffs, das des Zinks das $32\frac{1}{2}$-fache und das des Silbers das 108-fache von dem des Wasserstoffs. Zur Bestimmung des elektrochemischen Aequivalents kann diejenige Substanz gewählt werden, mit der am genauesten experimentiert werden kann. Lord Rayleigh hat gezeigt, daß eine solche Substanz das Silbernitrat ist; und er hat nachgewiesen, daß wenn ein Strom von 1 Ampère von einer Silberanode durch eine Silbernitratlösung nach einer Platinkathode geht, die Kathode jede Stunde an Gewicht um 4,025 Gramm zunimmt. Folglich ist das elektrochemische Aequivalent des Silbers

$$\frac{4{,}025 \text{ Gramm}}{1 \text{ Ampèrestunde}};$$

das elektrochemische Aequivalent des Wasserstoffes ist $\frac{1}{108}$ dieser Grösse, also

$$\frac{4{,}025 \text{ Gramm}}{108 \text{ Ampèrestunden}} = \frac{4{,}025}{108 \times 360} \text{ C. G. S.}$$

$$= 0{,}0001035 \text{ C. G. S.} = \frac{1}{96600} \text{ Gramm pro Coulomb.}$$

Also ist das Verhältnis von einem Atom Elektrizität zu einem Atom Wasserstoff gleich 9,660 $\mu^{-1/2}$ C. G. S. Einheiten oder annähernd gleich

$$10^4 \cdot \sqrt{\frac{\text{Centimeter}}{\mu \text{ Gramm}}};$$

die unbekannte Konstante μ erscheint notwendigerweise in diesem Ausdruck, weil wir Größen von verschiedener Natur oder jedenfalls Größen vergleichen, die in verschiedener Weise gemessen werden, nämlich „Elektrizität“ und „Materie“ (siehe Anhang D).

Der numerische Teil dieser Grösse ist ziemlich genau[1]) bekannt, d. h. innerhalb der Grenzen der Versuchsfehler; wir müssen nun weiter eine Schätzung der Größe des Atoms vornehmen. Dies kann in verschiedener Weise ausgeführt werden. Wir haben von Dr. Johnstone Stoney und von Loschmidt, ursprünglich selbst von Dr. Thos. Young, aber namentlich von Lord Kelvin gelernt, dass die Masse eines Atoms Wasser annähernd gleich 10^{-24} Gramm ist; also ist ein Atom Wasserstoff ungefähr gleich 10^{-25} Gramm und die Einheit der elektrischen Ladung ist gleich 10^{-21} magnenetischen C. G. S.-Einheiten oder gleich 10^{-10} elektrostatischen Einheiten oder gleich 10^{-20} Coulomb.

Ich habe das Verhältnis von m zu e oder von e zu m etwas eingehender besprochen, weil es im Folgenden eine wichtige Rolle spielt. Die absoluten Werte sind für uns von geringerer Bedeutung als das Verhältnis und sind nur annähernd bekannt, aber das Verhältnis ist ziemlich genau bekannt; für Wasserstoff ist das Verhältnis $e : m$ ziemlich genau gleich 10^4 (genauer 9660) magnetischen Einheiten.

Was wir von der elektrolytischen Leitung lernen ist also kurz zusammengefasst, daß jedes Atom eine gewiße bestimmte Ladung oder elektrische Einheit mit sich führt, und zwar ein einwertiges Atom eine solche Einheit, ein zweiwertiges deren zwei ein dreiwertiges drei aber niemals einen Bruchteil; dass in Flüssigkeiten diese Ladungen in bestimmter Weise mit den Atomen verbunden sind und nur an den Elektroden von ihnen hinweggerissen werden können; dass der Strom aus einer Bewegung solcher Ladungen besteht, die mit den Atomen fortschreiten; dabei werden die Ladungen von den Atomen oder die Atome von den Ladungen mitgeführt, je nach dem Gesichtspunkt, von welchen aus wir den Prozess betrachten.

---

1) Die Dezimalstellen sind oben richtig gedruckt; durch den Umstand, daß ein Coulomb oder eine Ampère-Sekunde ein Zehntel einer C. G. S.-Einheit ist — weil aus Versehen ein Ohm als 10^8 und ein Volt als 10^9 C. G. S.-Einheiten anstatt beide in derselben Weise definiert worden sind — kann immer Konfusion und Irrtum verursacht werden.

4. Kapitel.

Die Anfänge der Elektronentheorie.

Die Leitung in Gasen und die Existenz der freien Elektrizitätseinheit.

Wir wollen jetzt von den Flüssigkeiten zur Leitung in verdünnten Gasen, d. h. zu den Erscheinungen übergehen, welche man in Vakuumröhren beobachtet. Wenn eine lange Glasröhre etwa ein Meter lang und zwei Zoll weit, mit einer Elektrode an jedem Ende und mit gewöhnlicher Luft gefüllt, mit einem Induktionsapparat verbunden und an eine Luftpumpe angeschlossen wird — die gewöhnliche Funkenstrecke der Induktionsspule mag zwei bis drei Zoll lang sein — so finden wir, nachdem die Pumpe einige Zeit gearbeitet hat, daß die elektrische Entladung die zwei bis drei Zoll gewöhnlicher Luft einem langen Umweg durch die verdünnte Luft in der Röhre vorzieht, daß dagegen bei einem gewissen Grade der Verdünnung, die sich noch mit jeder gewöhnlichen Luftpumpe erreichen läßt, diese Bevorzugung aufhört. In der Röhre erscheint jetzt ein im Dunkeln leicht sichtbares flackerndes Licht, welches sehr bald das Ansehen von roten Streifen wie das Nordlicht annimmt, und alsbald hören die Funken außerhalb der Röhre in der gewöhnlichen Luft auf, ein Beweis, daß die verdünnte Luft jetzt der bessere Leiter und von den beiden Wegen der bequemere ist. Wenn die Verdünnung weiter fortschreitet, so wird die Achse der Röhre durch ein Glühen erleuchtet, welches jetzt viel heller ist und ein Lichtband oder einen Lichtfaden bildet, während die ursprüngliche Funkenstrecke nach und nach auf einen achtel Zoll oder weniger verkürzt werden kann, ohne daß ein Funken durch sie übergeht, ein Beweis, daß verdünnte Luft ein sehr guter Leiter ist. Wenn das beste Leitungs-

vermögen erreicht ist, so ist die Röhre mit rotem Licht, der sogenannten positiven Säule, angefüllt und beide Enden der Röhre sind von gleichem Ansehen. Wenn weiter evakuiert wird, — jetzt ist eine Öl- oder Quecksilberluftpumpe einer gewöhnlichen Luftpumpe vorzuziehen — so sieht man, wie die Lichtsäule die ganze Röhre füllt, wie sie nach und nach ihre leuchtend rote Farbe verliert und in eine Anzahl sehr schmaler Scheiben, wie von der Seite gesehene Münzen, zerfällt. Zugleich muß die Funkenstrecke auf ungefähr einen viertel bis einen halben Zoll verlängert werden, um zu verhindern, daß die Entladung diesen Weg nimmt, und es beginnt jetzt ein dunkler Raum an der Kathode zu erscheinen; dabei bedeckt sich die Kathode vollständig mit einem Glimmen, während die Anode gewöhnlich nur an einem oder zwei Punkten erleuchtet ist. Die Schichten, in welche die positive Säule zerfallen ist, werden dicker und entfernen sich voneinander bei fortschreitender Verdünnung. Der dunkle Raum an der Kathode wird ebenfalls größer und treibt gewissermaßen die positive Säule in die Anode hinein, und es hat den Anschein, als wenn er sogleich die ganze Röhre füllen würde; allein bevor er dies kann, beobachtet man, daß das Glimmlicht an der Kathode selbst sich von dieser in Gestalt einer Schale ablöst und einen zweiten dunklen Raum, der schmaler und dunkler als der erste ist, hinter sich zurückläßt. Der erste dunkle Raum ist der sogenannte Faradaysche, der zweite der sogenannte Croockessche. Dieser zweite dunkle Raum wird jetzt, je besser das Vakuum wird, immer dicker und drückt das Glimmlicht mehr zusammen; die Enden der Funkenstrecke müssen aber jetzt weiter auseinandergezogen werden, da sonst die Entladung einen ziemlich langen Weg durch die Luft vorziehen würde. Bei weiterer Evakuierung verschwindet das Glimmlicht vollständig und der zweite dunkle Raum füllt die ganze Röhre; jetzt beobachtet man eine neue Erscheinung, denn die Glaswände haben angefangen, mit einem Phosphoreszenzlicht zu glühen, dessen Farbe von der Art des Glases abhängt, die aber in der Regel grünlichweiss ist; dies hat offenbar seinen Grund darin, daß das Glas die Grenze des dunklen Raumes bildet. Wenn die Evakuierung noch weiter fortschreitet, so wird der Widerstand der Röhre sehr hoch, und der Funke springt durch eine gleich große und schließlich noch größere Länge gewöhnlicher Luft

über. Dies ist der Zustand der Röhre, die so eingehend von Crookes, von Lenard und Röntgen und vielen anderen Beobachtern untersucht worden ist, und die Erscheinungen in diesem dunklen Raum haben sich als höchst interessant und bedeutungsvoll erwiesen.

Kathodenstrahlen.

Bisher haben wir angenommen, daß die Kathode aus einem in die Röhre eingeführten Messingknopf oder etwas ähnlichem besteht; wenn wir aber jetzt dazu übergehen — wie zuerst Plücker 1859 tat, dann Hittorf (1869), Goldstein (1876) und Crookes (1879) — eine flache Scheibe oder ein napfförmiges Metallstück zu benutzen, und wenn wir dann in den dunkeln Raum verschiedene Substanzen einführen, so finden wir, daß Schatten geworfen werden und daß der dunkle Raum mit Eigenschaften angefüllt ist, die man am klarsten ausdrückt, indem man sagt, daß es eine Region von Kathodenstrahlen ist, d. h. von etwas, was in geraden Linien von der Kathode fortgeschleudert wird. Es wird offenbar etwas in dieser Weise fortgeschleudert — aber was es auch sein mag, es ist unsichtbar, so lange es nicht auf ein Hindernis stößt — etwas, was anscheinend in geraden Linien fliegt und nur eine wahrnehmbare Wirkung hervorbringt, wenn es angehalten wird. Ein solches „etwas" ist z. B. eine von einem Gewehr abgeschossene Kugel, die von der Seite her vollkommen unsichtbar ist, die aber beim Aufprallen auf eine Wand einen Blitz oder eine Flamme erzeugen oder sich durch sonstige Beschädigung bemerkbar machen kann. So ist es mit diesen Kathodenstrahlen. Die Region ihrer Flugbahn ist der dunkle Raum, und da wo sie die diesen Raum begrenzenden Wände treffen, werden diese erleuchtet. Eine Substanz mit Phosphoreszenzvermögen wie manche Mineralien oder selbst Glas phosphoresziert intensiv, und der Weg der Strahlen läßt sich verfolgen, indem man ein Glimmerblatt mit einem phosphoreszierenden Pulver bestreicht und quer in den Weg der Strahlen stellt. In dieser Weise lässt sich zeigen, dass die Strahlen allem Anscheine nach aus Teilchen bestehen, die sich in geraden Linien bewegen, nicht miteinander zusammenstoßen, ähnlich wie es bei Kugeln der Fall sein würde, die von einer großen Anzahl von parallelen Gewehren

abgeschossen werden. Wo sie die Glaswand treffen, erzeugen sie Phosphoreszenz; wenn sie mit Luft zusammentreffen, wie in einer nicht hinreichend evakuierten Röhre, so bringen sie auch diese zum phosphoreszieren und erzeugen so das gewöhnliche Glimmlicht, welches den dunklen Raum umgibt.

Diese Strahlen besitzen eine bedeutende Energie, was sich dadurch zeigen lässt, daß man sie vermittelst einer konkaven Kathode konzentriert und in einen Fokus vereinigt. Die Strahlen können in einen Fokus vereinigt werden, weil sie von der Kathode ursprünglich *normal* zu ihrer Oberfläche ausgesandt werden; allerdings ist der Fokus von der Kathode weiter entfernt als der Krümmungsmittelpunkt, weil etwas ähnliches wie gegenseitige Abstoßung der Strahlen stattfindet. Ein in diesem Fokus angebrachtes Stück Platin läßt erkennen (wenn die Evakuierung nicht zu hoch ist), daß es Rotgluttemperatur hat, d. h. es sendet Licht aus. Wenn die Evakuierung weiter fortschreitet, so wird weniger Wärme erzeugt, dagegen wird jetzt von geeigneten Substanzen, wie Tonerde und die meisten übrigen Erden, Phosphoreszenzlicht ausgesandt; wenn die Evakuierung noch weiter getrieben wird. so sendet die bombardierte Wand kein sichtbares Licht aus, sondern nur eine höhere Art von Strahlung, die sogenannten Röntgenstrahlen oder X-Strahlen. Es ist jedoch zweifelhaft, ob die Wand selbst diese Strahlen aussendet, oder ob ihre Funktion nicht vielmehr darin besteht, die Projektile so plötzlich als möglich durch die Massigkeit ihrer Atome anzuhalten. Dann würde die beste Wand eine Substanz mit den schwersten Atomen sein. Die X-Strahlen werden von den plötzlich angehaltenen Projektilen in einer Weise ausgesandt, die von Sir G. Stokes und von Professor J. J. Thomson untersucht worden ist und die für jeden verständlich ist, der die Eigenschaften elektrischer Ladungen studiert hat, die sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, die der Lichtgeschwindigkeit nahe- oder gleichkommt. Über diesen Gegenstand hat Heaviside mit großer Klarheit in seiner *Electromagnetic Theory* geschrieben.

Die Kathodenstrahlen haben ein bemerkenswertes Durchdringungsvermögen; eine dünne Metallscheidewand, namentlich wenn sie aus Aluminium besteht, ist, wie Hertz gefunden hat nicht imstande, den Durchgang der Strahlen vollständig zu

hindern, wie durch Phosphoreszenz und andere Wirkungen bewiesen wird, die man hinter der Scheidewand in der zweiten Hälfte der Röhre beobachtet.

An welcher Stelle sich die Anode befindet, ist bei solchen Versuchen ziemlich gleichgiltig. Irgendwo muß eine sein, und das einfachste ist, ihr die Gestalt eines Zylinders zu geben, durch den das Bombardement der Kathodenstrahlen hindurchgeht. Die bombardierenden Teilchen fliegen in geraden Linien von der Kathode gegen die gegenüberliegende Glaswand, einerlei wo die Anode angebracht ist; sehr gut kann man dies beobachten, wenn man der Röhre die Gestalt eines V gibt.

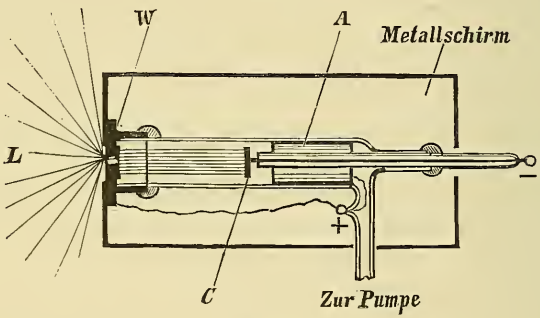


Fig. 1.

Lenardröhre zur Erzeugung von Lenardstrahlen, welche früher als die Röntgenstrahlen entdeckt wurden. *C* ist eine Kathode in einem hohen Vakuum; die Anode *A* ist ein Metallzylinder hinter ihr; das Ganze ist in einen Metallschirm eingeschlossen, und die Kathodenstrahlen treffen eine kleine Öffnung *W*, die durch äußerst dünne Aluminiumfolie verschlossen ist; durch diese treten die Strahlen in die Luft aus und strahlen von dem Aluminiumfenster nach allen Richtungen als Lenardstrahlen aus; hier werden sie schnell diffundiert und absorbiert.

Lenard erweiterte in bemerkenswerter Weise die Entdeckung von Hertz durch geschickte Konstruktion einer Röhre mit einem äußeren Fenster von sehr dünnem Aluminium, welches so eingerichtet war, daß es den äußeren Atmosphärendruck aushielt. Er richtete dann das Bombardement der Kathodenstrahlen gegen dieses Fenster aus Aluminlumfolie und zeigte, daß die Strahlen das Aluminium durchdringen und in die äußere Lurt eintreten; diese in die Luft eindringenden Strahlen werden zu Ehren dieses

unermüdlichen Forschers, eines Freundes und Schülers von Hertz, Lenardstrahlen genannt (s. Fig. 1).

Diese Lenardstrahlen bringen die Luft zum phosphoreszieren und bringen die anderen Wirkungen hervor, welche die Kathodenstrahlen hervorbringen können, aber sie dringen nur auf eine geringe Entfernung in die Luft, da sie durch den ungeheueren Widerstand, dem sie in einer Substanz von der Dichtigkeit der gewöhnlichen Luft begegnen, schnell vernichtet werden. Die hemmende Wirkung, welche verschiedene Substanzen auf diese Strahlen ausüben, scheint nur von der Menge der Materie, in welche die Strahlen eindringen, nicht von der Natur dieser Materie abhängig, und zwar einfach dieser Menge proportional zu sein. Eine Luftschicht ist ungefähr ebenso undurchsichtig wie eine Wasserschicht, deren Dicke $^1/_{800}$ von der Dicke der Luftschicht ist; und selbst wenn der Körper, auf den die Strahlen treffen, ein undurchsichtiger fester Körper wie ein Metallblech ist, wenn es nur dünn genug und nicht zu massiv ist, so dringen die Strahlen durch und erzeugen auf der anderen Seite Phosporeszenzerscheinungen. Die Strahlen können auch auf photographische Platten wirken, und sie bringen überhaupt alle Wirkungen, wenn auch in geringerem Grade und mit viel geringerem Durchdringungsvermögen hervor wie die später entdeckten Röntgenstrahlen.

Die Lenardstrahlen siud offenbar aus der Röhre ausgetretene Kathodenstrahlen; und zur Zeit ihrer Entdeckung nahm man allgemein an, daß es fliegende elektrisch geladene materielle Teilchen seien; allein die außerordentlich große Strecke von fast einem Zoll, die sie in gewöhnlicher Luft zurücklegen, widerspricht einer solchen Hypothese, da materiellle Atome in gewöhnlicher Luft nicht um $^1/_{1000}$ Zoll ohne zahlreiche Zusammenstöße fortschreiten können.

Lenard schloß sich daher der zuerst von Goldstein ausgesprochenen Ansicht an, daß sie nicht materieller, sondern ätherartiger Natur seien. Diese Ansicht ist in dem Sinne, wie er sie vermutlich auffaßte, unhaltbar — denn sie sind ihrer Natur nach nicht Ätherwellen oder etwas wie Strahlung — aber sie sind auch, wie wir sehen werden, ebensowenig wie die Kathodenstrahlen gewöhnliche materielle Teilchen. Aber dies ist gerade der Punkt, den wir jetzt zu betrachten haben, und wir müssen zu diesem

Zwecke auf die Beobachtungen von Crookes vom Jahre 1879 zurückkommen. [1])

Natur der Kathodenstrahlen.

Wir haben gesehen, daß das Aufprallen der Kathodenstrahlen, indem wir uns einer Ausdrucksweise bedienen, die der Annahme, daß sie geladene Teilchen sind, angemessen ist, teils Wärme oder Schwingung der getroffenen Moleküle zur Folge hat, teils Licht oder Phosphoreszenz, herrührend von dem Vibrieren der elektrisch geladenen Atome (oder vielmehr der elektrischen Ladungen der Atome) wie beim gewöhnlichen Strahlungsprozeß und teils X-Strahlen. Alle diese Wirkungen sind in den verschiedenen Stadien der Evakuierung einer Crookes'schen Röhre zu beobachten. Die *Bewegungsgröße* der von der Kathode fortgeschleuderten Teilchen kann auch gezeigt werden, indem man ein kleines Schaufelrad in ihren Weg stellt, welches dann mechanisch in Drehung versetzt wird, ebenso wie die Flügel eines Radiometers durch den Rückstoß der Moleküle der noch vorhandenen Luft in Bewegung gesetzt werden, wodurch eine Kraftwirkung zwischen den Flügeln und der Glasumhüllung erregt wird. Bei dem Versuch mit einer elektrischen Vakuumröhre scheint die Kraftwirkung zwischen der Kathode und einer nicht weit von ihr entfernten Schicht des noch vorhandenen Gases zu bestehen. Denn vorausgesetzt, daß die Evakuierung nicht eine sehr hohe ist, ist der Potentialgradient in der Nähe der Kathode sehr hoch. Die bewegende Kraft ist also offenbar die Kraft der elektrischen Abstoßung, indem die Teilchen sich wie bei der gewöhnlichen Elektrolyse dem Potentialabfall entlang bewegen und dann für den Rest ihres Weges mit der erreichten Bewegungsgröße weiter fortschreiten. Allein während sie bei der gewöhnlichen Elektrolyse fortwährend anstoßen, können sie in einem hohen Vakuum einige Zoll weit fliegen ohne anzustoßen, und also ohne irgend eine Störung zu verursachen. Sie erzeugen

1) Die biographische Geschichte dieses Gegenstandes ist in den damals zwischen Crookes und Stokes gewechselten Briefen ausführlich dargelegt. Diese Briefe sind von Sir William Crookes zur Verfügung gestellt und werden binnen kurzem in der *Scientific Correspondence of Sir George Stokes* veröffentlicht werden.

daher weiter nichts als den dunklen Raum. Sichtbare Erscheinungen treten nur ein, wenn sie auf ein Hindernis treffen.

Dies war die von Crookes aufgestellte und allgemein angenommene Theorie der Kathodenstrahlen. Man nahm an, es seien fliegende Atome, die sich mit gewöhnlicher Molekulargeschwindigkeit, aber mit einer großen freien Weglänge bewegen. Diese freie Weglänge war viel größer, als nach der gewöhnlichen Gastheorie zu erwarten war, und es war etwas schwierig, sie mit der Annahme in Einklang zu bringen, daß es sich um fliegende Atome handelt, die den gewöhnlichen Gasgesetzen gehorchen; da sie alle in derselben Richtung fortgeschleudert wurden, war ihre Bewegung regelmäßiger und Zusammenstöße erfolgten weniger zahlreich oder weniger wirksam, als wenn sie sich regellos in allen Richtungen bewegt hätten. Auch in ihrer Bewegungsgröße zeigt sich dieselbe Regelmässigkeit; ihre Bewegung ist nicht Wärmebewegung und kann nicht als etwas der Temperatur entsprechendes betrachtet werden; sie bewegen sich in regelmäßiger Aufeinanderfolge wie eine Armee oder ein Wind, nicht in der unregelmäßigen Weise, wie wir uns die Bewegung nach der gewöhnlichen kinetischen Gastheorie vorstellen, wenn wir von „Wärme“ oder „Temperatur“ reden. Crookes sprach — einer unmittelbaren Intuition folgend, wie sie zuweilen einem Entdecker beschieden sind, aber oft von den zeitgenössischen Vertretern der orthodoxen Wissenschaft lächerlich gemacht werden — die Vermutung aus, daß er Materie in einem „vierten Aggregatzustand“ erhalten habe, ja daß er in seiner Röhre etwas wie die „Korpuskeln“ der Lichttheorie habe. Selbst in diesem letzten Satz liegt etwas tatsächliches, wenn sich die Teilchen sehr schnell bewegen, denn dann bewegt sich eine im Entstehen begriffene Wellenfront oder ein Ätherpuls mit ihnen; aber wie richtig es war, daß sich die Materie in dem dunklen Raum in einem vierten Aggregatzustand befand, nicht im festen, noch auch im flüssigen oder gasförmigen, wie richtig dies war, werden wir sogleich sehen.

Zunächst wollen wir die Tatsachen zusammenstellen, welche für die Ansicht geltend gemacht werden können, daß die Kathodenstrahlen jedenfalls geladene Teilchen irgendwelcher Art sind, die sich mit ungeheuerer Geschwindigkeit bewegen. Daß sie in Bewegung sind, geht aus ihrem Bombardement hervor,

durch welches sie Schaufelrädchen treiben, Platin erwärmen und andere ähnliche Wirkungen hervorbringen können, und daß sie geladen sind, läßt sich am einfachsten dadurch zeigen, daß man sie in einem hohlen Gefäß auffängt, welches mit einem Elektroskop verbunden ist; dies Verfahren wurde von Perrin eingeschlagen; ein anderes Verfahren besteht darin, zu zeigen, daß sie die Eigenschaften eines elektrischen Stromes besitzen. Wenn sie geladen sind, während sie in Bewegung sind, so bilden sie nach der Maxwellschen Theorie einen Strom und müssen infolgedessen einen Magnet ablenken oder von einem solchen abgelenkt werden; und hiermit kommen wir zu einem der einfachsten und wichtigsten Experimente der heutigen Physik. Eine zweckmäßige Form wurde diesem Versuch, der schon von Plücker (1862) angedeutet und von Hittorf, Goldstein und anderen Beobachtern der Vakuumröhre verbessert wurde, im Jahre 1879 von Crookes gegeben.

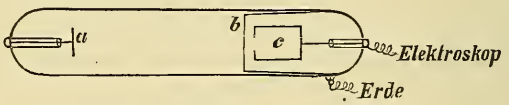


Fig 2.

Einfachste Form von Perrins Apparat, um zu zeigen, daß Kathodenstrahlen eine negative Ladung mit sich führen. Die Strahlen von *a* gehen durch einen nach der Erde abgeleiteten Schirm *b* in ein hohles oder Faradaysches Gefäß *c*.

Er machte die Bahn der Strahlen sichtbar, indem er einen Büschel derselben durch einen Spalt gehen und über die Oberfläche eines mit phosphoreszierendem Pulver bestrichenen Glimmerblattes streichen ließ und dann einen gewöhnlichen Hufeisenmagnet annäherte. Wenn dies geschieht, so erscheint der Weg der Strahlen sofort gekrümmt, ein Beweis, daß es nicht ein Lichtstrahl ist, was wir sehen, sondern ein Strom geladener Teilchen, denn sie verhalten sich wie ein elektrischer Strom und werden vom Magnet abgelenkt. Es ist im wesentlichen dieselbe Erscheinung, welche auch beobachtet werden kann, wenn auch nur schwierig, wenn ein Strom durch Metalle fließt, ein Effekt, der von E. H. Hall in Amerika entdeckt und nach ihm Hall-Effekt benannt worden ist.

Der Umstand, daß die Teilchen von der Kathode fortgeschleudert und anscheinend heftig von ihr abgestoßen wurden, genügt, um annehmen zu müßen, daß sie negativ geladen sind; die Richtung der durch das magnetische Feld verursachten Krümmung setzt uns in den Stand, zu beweisen, daß die fliegenden Teilchen *negativ* geladen sind, und ein vergleichbarer Strom von positiven Teilchen in entgegengesetzter Richtung oder in sonst einer Richtung ist nicht beobachtet worden. Die Geschwindigkeit des positiven Stromes ist sehr groß, und er muß durch eine große Anzahl positiver Teilchen befördert werden, aber im isolierten Zustand ist ihre Bewegung verhältnismäßig langsam (vgl. jedoch 6. Kap.). In dieser Hinsicht ist die magnetische Krümmung der Kathodenstrahlen in Gasen verschieden von magnetischer Krümmung eines Stromes in Metallen; während nämlich in Metallen die Wirkung zuweilen auf den negativen und zuweilen auf den positiven Strom die größere ist, je nach der Natur des Metalls — der Unterschied, das einzige, was beobachtet werden kann, ist immer gering — ist es im Kathodenstrom nur der negative, auf den eine Wirkung stattfindet, und die Wirkung ist immer stark.

Es scheint also, daß die negativ geladenen Körper in einer Vakuumröhre aus irgend einem Grunde viel beweglicher sind als die positiven und daß die Beweglichkeit der negativ geladenen Körper eine ganz außerordentliche ist. In auffallender Weise machte sich ihre Beweglichkeit geltend bei der fundamentalen Beobachtung von Prof. Schuster[1]), daß alle Teile eines in ein Gefäß eingeschlossenen Gases leitend wurden, wenn in einer Ecke desselben eine elektrische Entladung stattgefunden hatte; daß, selbst wenn das Gefäß aus verschiedenenen Abteilungen bestand, eine Abteilung durch eine Entladung in der anderen schwach leitend gemacht wurde, wenn nur die Inhalte beider Abteilungen untereinander in Verbindung standen; dies schien darauf hinzudeuten, daß äußerst bewegliche Teilchen, vermutlich die negativ geladenen Teilchen von Kathodenstrahlen, in sehr kurzer Zeit eine beträchtliche Strecke zurücklegen und an der Fortpflanzung eines elektrischen Stromes teilnehmen konnten. Die

1) Bakerian lecture 1890, *Proc. Roy. Soc.*, vol. 47, p. 526.

Leitungsfähigkeit von Gasen beruhte offenbar ausschließlich auf der Anwesenheit dieser isolierten oder dissoziierten geladenen Teilchen oder Ionen, und wo sie abwesend waren, leitete das Gas überhaupt nicht; es konnte als schwaches Dielektrikum durch eine hinreichend starke Kraft durchbrochen werden, aber es leitete nicht; wenn aber diese isolierten geladenen Teilchen anwesend waren, so leitete es gut und wurde in jeder Hinsicht ein Elektrolyt, der dem schwächsten elektrischen Einfluß zugänglich war. Die Erzeugung dieses elektrolytischen Zustandes wird als „Ionisierung" bezeichnet. Der Durchgang einer elektrischen Entladung durch die Luft machte demnach diese vorübergehend elektrolytisch. Ihre elektrolytische Eigenschaft hielt aber nicht lange an. Die Beweglichkeit der Teilchen, die sie befähigt, einen beträchtlichen Weg zurückzulegen, befähigt sie auch zu verschwinden, indem sie sich an der Gefäßwand festsetzen oder vielleicht, indem sie sich wieder mit entgegengesetzten Ladungen vereinigen, mit denen sie bei rascher Bewegung zufällig zusammentreffen müssen. Prof. Townsend[1]) fand jedoch, daß das Leitungsvermögen unerwartet lange anhielt, wenn kein Staub anwesend war. Die Staubteilchen wirken anscheinend in der Weise, daß sie die Ladung aufnehmen und den Austausch befördern, der nicht leicht durch direktes Zusammenstoßen bewirkt wird. Und die Zeit, welche verlief, bevor die Leitfähigkeit der staubfreien Luft vollständig verschwend, ließ vermuten, daß die bewegten Teilchen sehr klein sein mußten, so daß unmittelbare Zusammenstöße verhältnismäßig wenig häufig waren.

Die Beweglichkeit oder Diffusibilität der Moleküle eines Gases hängt von ihrer mittleren freien Weglänge ab und diese hängt von ihrer Grösse ab; je kleiner sie sind, desto leichter entgehen sie einem Zusammenstoß. Aus diesem Grunde sind Zusammenstöße in der Astronomie so selten; die Körper sind klein im Vergleich zu den Zwischenräumen, durch die sie von einander getrennt sind. Das Verhalten geladener Teilchen schien darauf hinzudeuten, daß sie in manchen Fällen kleiner als Atome sein müssen; es war sehr unwahrscheinlich, daß sich materielle Atome

1) J. S. Townsend vom Trinity College in Dublin, welcher damals im Cavendish-Laboratorium in Cambridge arbeitete, jetzt Waynflete-Professor der Physik an der Universität Oxford.

so verhalten könnten wie sie. Es wurde daran erinnert, daß verschiedene Forscher, unter anderen Dr. Johnstone Stoney, die Ansicht geäußert hatten, daß die elektrischen Ladungen eines Atoms in konzentrierter Form nicht über die ganze Oberfläche verbreitet, sondern in einem oder mehreren Punkten konzentriert sind, die vielleicht der Hauptmasse des Atoms gegenüber die Rolle von Satelliten spielen; nach dieser Ansicht war es ganz gut möglich, daß diese fliegenden Teilchen überhaupt keine geladenen Atome waren, sondern Ladungen ohne die Atome, die konzentrierten, isolierten Ladungen, die bei der heftigen Entladung von den Atomen hinweggeflogen waren und sich frei bewegten. Solche Teilchen würden sich natürlich mit ungeheuerer Geschwindigkeit bewegen, da sie immer noch unter dem Einfluß der vollen elektrischen Kraft stehen würden, die vorher auf sie wirkte, während sie sich von der Last des materiellen Atoms, mit dem sie verbunden waren, frei gemacht haben. Solche körperlose Ladungen oder elektrische Geister waren allerdings niemals beobachtet worden. Alle Versuche, die in der Elektrostatik gemacht worden waren, waren mit geladener Materie gemacht worden; die Oberfläche der Materie war der Sitz der elektrischen Ladung und ein anderer Sitz der Ladung war nicht bekannt. Die Erscheinungen der Elektrolyse hatten vermuten lassen oder bewiesen, daß die Atome selbst Ladungen bewegen können, und daß also, wenn eine Flüßigkeit geladen war, dies daher rühren mußte, daß einige der Atomladungen der einen Art in überwiegender Anzahl auf der Oberfäche erschienen, wenn auch vielleicht noch in Verbindung mit den zugehörigen Atomen.

Aber um dieselbe Zeit ließen die Vorgänge an einer Elektrode, wo ein Ion offenbar seine Ladung abgibt und ohne dieselbe frei wird, die *Möglichkeit* erkennen, daß die elektrische Ladung vielleicht für sich allein existieren kann, jedenfalls daß sie von einem Atom zu einem andern übergehen kann und es also denkbar ist, daß sie einen Augenbiick isoliert existiert. Während dieser momentanen Isolierung entweichen vielleicht in der Freiheit eines verdünnten Gases einige Ladungen und wandern frei umher.

Solchen hypothetischen isolierten Ladungen, der Ladungseinheit oder der Ladung eines einwertigen Atoms hat man den

Namen „Elektron“ gegeben; und wenn ich von einem „Elektron“ rede, so meine ich damit, zunächst rein hypothetisch, isolierte elektrische Ladung. Mit dem Namen „Ion“ dagegen bezeichne ich immer das Atom und seine Ladung zusammen. Die Ionen bestehen aus Faraday'schen Anionen und Kationen. Lord Kelvin zieht die Bezeichnung Elektrionen vor.

Wenn nun die fliegenden Teilchen, welche die Kathodenstrahlen bilden, nicht Ionen, sondern Elektronen wären, wenn sie isolierte Ladungen wären, die ihre Atome (natürlich positiv geladen) hinter sich zurücklassen, so würde ihre außerordentliche Beweglichkeit und Diffusibilität und ihre große Geschwindigkeit durchaus natürlich sein; und obwohl sie nicht „Materie“ im gewöhnlichen Sinne des Wortes sein würden, so darf es uns doch nicht befremden, wenn sie einige von den Eigenschaften der Materie besitzen, wenigstens solche Eigenschaften, die zur Materie gehören, weil sie Trägheit besitzt; denn eine Ladung besitzt, wie wir gesehen haben, eine gewiße Art imitierter Trägheit. Diese Elektronen würden also Bewegungsgröße besitzen und würden daher imstande sein, ein Schaufelrädchen in Bewegung zu setzen (die Bewegung der Rädchen in den Crookes'schen Röhren rührt allerdings wahrscheinlich weniger von einfacher Bewegungsgröße, als vielmehr von Ladung und elektrischer Abstoßung her); sie würden kinetische Energie besitzen und infolgedessen imstande sein, ein Stück Platin zu erhitzen; und wenn sie plötzlich durch eine massive Wand angehalten werden, während sie sich mit großer Geschwindigkeit bewegen, so können sie leicht zu Phosphoreszenzerscheinungen Veranlaßung geben und selbst zu dem unter dem Namen der X-Strahlen bekannten plötzlichen Strahlungspuls. Die Existenz dieser letzteren Eigenschaft können wir tatsächlich aus elektrischen Prinzipien ableiten, wenn wir etwas weiter in die Sache eingedrungen sein werden (siehe 9. Kap.).

Um einen kontinuierlichen Strom von Elektronen durch eine Vakuumröhre zu unterhalten, muß irgend ein Mechanismus vorhanden sein, durch den die Elektronen in der Nähe oder auf der Kathode immer und immer wieder neu gebildet werden, da sie sonst fast momentan erschöpft sein würden. Wahrscheinlich ist die richtige Erklärung des Vorganges die von J. J. Thomson gegebene, nach welcher der Strom hauptsächlich durch positive

Ionen befördert wird, die in dem Gas durch Ionisirung erzeugt werden, die von der ersten Entladung der Kathodenstrahlen herrührt. Diese positiven Ionen bewegen sich dann verhältnismäßig langsam nach der Kathode, nähern sich derselben so gut sie dem Bombardement gegenüber können; schließlich — unter dem Einfluss des starken Potentialgradienten in unmittelbarer Nähe der Kathode — stürzen sie sich auf die letztere und erzeugen durch ihren Anprall einen frischen Vorrat von Elektronen. Man nimmt an, daß das Glühen auf der Kathode diese Ionisierungsregion bezeichnet. Die auf diese Weise frei gewordenen negativen Teilchen fliegen dann als Kathodenstrahlen fort, bewirken neue Ionisierung und erzeugen einen reichlichen weiteren Vorrat von positiven Ionen, auf deren Existenz die Möglichkeit der Kathodenstrahlen selbst beruht. Die positiven und die negativen Teilchen sind nach dieser Ansicht gegenseitig voneinander abhängig; die einen sind die Ursache der anderen; und wenn die einen von ihnen in einer Vakuumröhre nicht entstehen können, so ist sie unfähig zu leiten, selbst wenn die Enden stark elektrisiert sind; denn sobald der Vorrat der einen Art von Ionen erschöpft ist, verschwinden auch sofort die der anderen Art. Hierdurch erklärt sich die Wirkung der „elektrischen Ventile", in denen die positiven Ionen verhindert werden in der einen Richtung nach der Kathode zu kommen, indem durch eine besondere Vorrichtung ein Elektronenbombardement auf den direkten Weg konzentriert wird, ohne daß eine Hintertür oder ein Seiteneingang für die positiven Ionen vorhanden ist. Das Vorhandensein einer solchen Hintertür erleichtert, selbst wenn der Weg sehr lang ist, das Entstehen des Stromes außerordentlich, wie Hittorf durch einen überraschenden Versuch gezeigt hat.

Man hat beobachtet, daß ein in den dunklen Raum an der Kathode eingeführtes Hindernis, wenn es den Zutritt positiver Ionen zu verhindern vermag, nach beiden Seiten einen Schatten wirft, einen nach der Kathode hin und einen in der Richtung der Kathodenstrahlen, weil hierbei die Erzeugung frischer Elektronen an der betreffenden Stelle verhindert wird[1]). Die Tatsachen

1) Schuster, *Proc. Roy. Soc.* XLVII. p 557, 1890; Wehnelt, *Wied. Ann.* LXVII, p. 421, 1899.

welche wir bis jetzt kennen gelernt haben, können wir in folgender Weise zusammenfassen:

Die Größen, welche im Zusammenhang mit den Kathodenstrahlen experimentell bestimmt werden müssen, um ihre wahre Natur zu ermitteln, sind die Geschwindigkeit, die elektrische Ladung und wo möglich die Masse der fliegenden Teilchen.

Es deutet alles darauf hin, dass ihre Geschwindigkeit eine ganz ungeheure ist, aber es ist wünschenswert, daß diese Geschwindigkeit gemessen wird.

Die ungeheure Kraft, mit der sie fortgeschleudert werden, zeigt an, daß sie stark geladen sind; und ihr Duchdringungsvermögen deutet darauf hin, daß sie außerordentlich klein sind, so daß gewöhnliche feste Körper wie Metallplatten für sie porös sind; aber es ist eine experimentelle Methode erforderlich, um das, was man ihr elektrochemisches Äquivalent nennen kann, zu bestimmen d. h. das Verhältnis ihrer Masse oder Trägheit zu ihrer elektrischen Ladung, selbst wenn es nicht möglich ist, die Masse und die Ladung getrennt zu bestimmen.

Bei der Elektrolyse hängt das elektrochemische Äquivalent oder das Verhältnis m/e von der Natur der Substanz ab; und für Wasserstoff ist es, wie im 3. Kap. gesagt wurde, von der Ordnung 10^{-4} in elektromagnetischen Einheiten. Es ist von außerordentlicher Wichtigkeit, den Wert desselben Verhältnisses für die Kathodenstrahlen zu ermitteln und festzustellen, ob er sich mit der in der Vakuumröhre enthaltenen Substanz ändert oder ob er für alle Substanzen derselbe ist, so daß er ein Kennzeichen einer einzigen Varietät von fliegenden Teilchen sein würde.

5. Kapitel.

Bestimmung der Geschwindigkeit und des elektrochemischen Aequivalents der Kathodenstrahlen.

Wenn die Kathodenstrahlen aus fliegenden elektrisch geladenen Teilchen bestehen, so müssen sie durch Annäherung eines Magnets abgelenkt werden; daß dies der Fall ist, ist eine bekannte und für die Kathodenstrahlen sehr wichtige Tatsache. Die Größe der Ablenkung, welche durch ein magnetisches Feld von bekannter Stärke hervorgebracht wird, zu messen, bietet aber keine Schwierigkeit.

Die obere Krümmung der Bahn der Kathodenstrahlen, welche durch ein transversales magnetisches Feld bewirkt wird, oder die spiralförmige Krümmung, welche durch ein longitudinales magnetisches Feld erzeugt wird, bildet offenbar ein Mittel, durch welches die Schätzung der Geschwindigkeit der Strahlen in Angriff genommen werden kann.

Wenn die Geschwindigkeit konstant und das magnetische Feld gleichförmig ist, so ist die Kurve, in welche der Strahl um die Kraftlinien gebogen wird, offenbar ein Kreis; und der Verlauf dieses Kreises kann leicht verfolgt werden, entweder direkt nach dem Verfahren von Crookes, indem man den Strahl über eine phosphoreszierende Substanz streichen läßt, oder indirekt aus der Lage eines linearen Schirmes, der so eingestellt wird, daß er die abgelenkten Strahlen auffängt. Wenn die Richtung der Geschwindigkeit gegen die Richtung des Feldes geneigt ist, so ist die Bahn eines Teilchens zusammengesetzt aus einer kreisförmigen Bewegung um eine Kraftlinie und einer unveränderten geradlinigen Bewegung in der Richtung derselben, d. h. sie ist eine mehr

oder weniger gestreckte Spirale in der Richtung des magnetischen Feldes. Die Drehungsrichtung der Spirale hängt von der Richtung des Feldes ab.

Die Bestimmung des Krümmungsradius r bietet keine Schwierigkeiten; und die Theorie der normalen Ablenkung ist höchst einfach; sie besagt weiter nichts, als daß die magnetische Kraft H, welche auf das Stromelement eu wirkt, die ablenkende Kraft oder Zentripetalkraft, mu^2/r, ist, die erforderlich ist, um die mechanische Trägheit des Teilchens zu überwinden, d. h.

$$\frac{mu^2}{r} = \mu\, eu\, \mathrm{H},$$

also

$$\frac{m}{e}\, u = \mu\, \mathrm{H}\, r,$$

oder das Verhältnis e/m verhält sich zur Geschwindigkeit der Teilchen wie die Krümmung ihrer Bahn zur Intensität des magnetischen Feldes, welches die Krümmung bewirkt. Prof. Schuster in Manchester war einer der ersten, die derartige Messungen ausgeführt haben.

Die beiden Faktoren auf der rechten Seite dieser Gleichung sind direkt meßbar (μ wird gewöhnlich ignoriert oder, was vorzuziehen ist, mit H zur sogenannten Induktionsdichtigkeit zusammengefaßt); die beiden Faktoren auf der linken Seite dagegen sind beide unbekannt. Es kann also keiner von beiden auf diese Weise bestimmt werden, sondern es muß über den einen oder den anderen eine Annahme gemacht werden oder es muß ein zweiter, vom ersten unabhängiger Versuch ausgeführt werden.

Nimmt man an, was manche Forscher getan haben, daß u eine Geschwindigkeit ist, wie sie Gasatomen bei gewöhnlicher Temperatur eigen sein kann, so ergibt sich für e/m ein Wert, der nicht sehr verschieden von der gewöhnlichen, bei der Elektrolyse von Flüssigkeiten gemessenen Geschwindigkeit, nämlich gleich 10^4 C. G. S. Einheiten ist. Oder umgekehrt, wenn man für dieses Verhältnis den gewöhnlichen elektrolytischen Wert annimmt, so ergibt sich für die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen ein Wert, der ganz gut der Geschwindigkeit materieller Atome zukommen könnte.

Dies würde jedoch ein Trugschluß sein. Ein solches zufälliges Zusammentreffen kann den Fortschritt in ernsthafter Weise hemmen, da es den Geist befriedigt und von weiterem Forschen abhält. Es ist fast unmöglich, solche falsche Schlüsse zu vermeiden, und sie werden gewöhnlich angenommen, bis eine gründliche Bekanntschaft mit dem Gegenstand zu der instinktiven Empfindung führt, daß irgendwo etwas falsch ist.

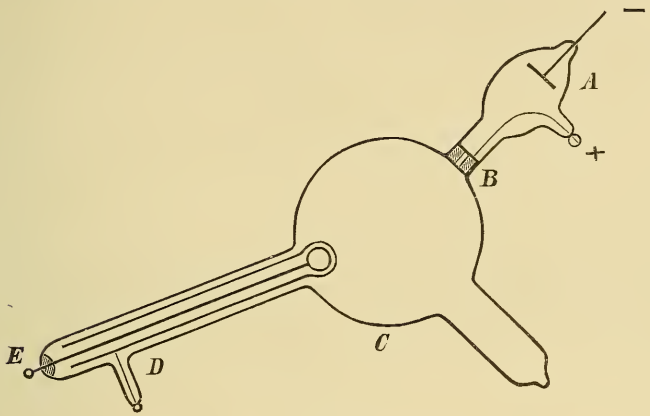


Fig. 3.

Modifizierter Perrin'scher Apparat, den J. J. Thomson zum Messen der Ladung sowie der magnetischen Ablenkung, zuweilen auch der Wärmewirkung der Kathodenstrahlen benutzte. Die von der Kathode kommenden Strahlen gehen durch eine durchbohrte Anode und gehen geradlinig weiter; sie können durch einen Magnet um einen gemessenen Betrag abgelenkt werden, so daß sie durch eine Öffnung in einem nach der Erde abgeleiteten Schutzschirme *D* in einen Hohlraum eintreten, in dem sich eine Elektrode *E* befindet, durch welche die Gesamtladung gemessen werden kann.

So ist es auch in diesem Falle; die grosse freie Weglänge und das Durchdringungsvermögen der Kathodenstrahlen bildeten immer einen Widerspruch gegen die Annahme, daß die Teilchen Atome gewöhnlicher Materie sein. Diese Annahme wurde von Lenard und Crookes trotz Widerspruchs und wichtiger Gegengründe instinktmässig bekämpft, und ebenso richtete J. J. Thomson im Jahre 1897 einen noch ernsthafteren Angriff gegen die ganze Position.

Er ließ die Strahlen durch einen Magnet in ein isoliertes Gefäß reflektieren, welches mit einem Elektrometer von bekannter

Kapazität verbunden war, so daß die gesamte Ladung der in einer gegebenen Zeit gesammelten Kathodenstrahlenteilchen durch den beobachteten Anstieg des Potentials gemessen werden konnte (vgl. Fig. 3). Innerhalb des Gefäßes fielen sie auf ein thermoelektrisches Element von bekannter Wärmekapazität, welches durch sehr dünne Drähte mit einem Galvanometer in Verbindung stand (welches also als Kalorimeter wirkte) so dass die gesamte Energie der Strahlen gemessen wurde.

So konnten zur gleichen Zeit die folgenden Bestimmungen gemacht werden:

$$\mathrm{N}\, e = \mathrm{Q}$$

$$\mathrm{N}\, \tfrac{1}{2} m u^2 = \mathrm{W}$$

$$\frac{m}{e} u = \mu\, \mathrm{H}\, r$$

Die drei Gleichungen enthalten vier unbekannte Größen; aber ein Paar derselben kann als ein Verhältnis behandelt und eine andere N kann eliminiert werden. So erhalten wir

$$u = \frac{2\ \mathrm{W}}{\mathrm{Q}\ \mathrm{H} r}$$

$$m/e = \frac{\mathrm{Q}}{2\,\mathrm{W}} (\mu\, \mathrm{H}\, r)^2.$$

Als diese glänzenden Messungen im Laboratorium wirklich ausgeführt wurden, wurde die atomistische Natur der Kathodenstrahlen zwar nicht vollständig widerlegt, aber doch im höchsten Grade unwahrscheinlich gemacht; denn es zeigte sich, daß ihre Geschwindigkeit von der Ordnung zehntausend Meilen pro Sekunde oder in günstigen Fällen gleich $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit, jedenfalls immer von der Ordnung 10^9 C. G. S., während das elektrochemische Äquivalent von der Ordnung 10^{-7} C. G. S. oder unfähr gleich $\frac{1}{1000}$ von dem des Wasserstoffs war.

Ein Wechsel des in der Röhre enthaltenen Gasrestes, sowie ein Wechsel der Elektroden hatte keinen Einfluß auf diesen letzteren Wert. *Die Kathodenstrahlen waren augenscheinlich unabhängig von der Natur der anwesenden Materie,* eine außerordentlich wichtige Tatsache. Wenn sie überhaupt Materie wären, so wären

sie offenbar Materie von einer ganz anderen Art als die von der gewöhnlichen Chemie unterschiedenen Arten. Allein ihre Geschwindigkeit hing von der Potentialdifferenz zwischen den Elektroden in einer Weise ab, die vermuten ließ, daß sie Projektile seien, die durch den Potentialgradienten getrieben wurden, der auf eine gegebene Weglänge wirkte. Sie wurden von der Kathode durch eine Öffnung in die Anode geschleudert, und die Messung ihrer Geschwindigkeit wurde in der Röhre jenseits der Anode gemacht, wo sie durch ihre eigene Bewegungsgröße fortschreiten. Der Abstand zwischen Anode und Kathode hatte keinen Einfluß auf diese Geschwindigkeit. wie es auch von der Projektilhypothese erfordert wurde; denn wenn auch der Potentialgradient steiler wird, wenn Anode und Kathode einander mehr angenähert werden, so wird die Weglänge, auf welcher die Teilchen ihm ausgesetzt sind, um einen kompensierenden Betrag kleiner, so daß die Geschwindigkeit theoretisch vom Abstand der Elektroden unabhängig ist, solange die gesamte Potentialdifferenz konstant gehalten wird; es ist die absolute Potentialdifferenz, durch welche die Geschwindigkeit bestimmt wird. (Dies ist eine bekannte Folge der Erhaltung der Energie, die auch beim gewöhnlichen Fall der Körper beobachtet wird.) Wenn allerdings die Elektroden zu nahe bei einander sind, so kann es schwierig sein, eine hohe Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode herzustellen, da außerhalb der Röhre ein Funken von der einen zur anderen überspringen kann; und wenn ein erheblicher Gasrest in der Röhre ist, so ist es ebenfalls schwierig, eine hohe Potentialdifferenz zu erhalten, weil das Gas unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen leitend wird. Infolgedessen erhält man die besten Geschwindigkeiten in einem hohen Vakuum; und wenn die Dichtigkeit des Gases in der Röhre konstant ist, so ist auch die Geschwindigkeit konstant. Die Natur der Elektroden hat keinen Einfluß, vorausgesetzt, daß sie kein Gas abgeben oder sonst die Erhaltung der erforderlichen Potentialdifferenz erschweren.

Während sich also ergab, daß die Geschwindigkeit der Teilchen in den Kathodenstrahlen außerordentlich groß war, war ihre Energie nur eine mäßige, woraus folgt, daß ihre Masse eine äußerst geringe ist; dagegen war ihre gesamte elektrische Ladung bedeutend. Sie waren imstande, im Laufe einer Sekunde eine

elektrische Kapazität von 0,15 Mikrofarad um einige Volt, zuweilen um 5 Volt zu erhöhen; und in derselben Zeit konnten sie die Temperatur eines Kalorimeters, dessen Wärmekapazität ungefähr 4 Milligramm Wasser war, um 2^0 C steigern. Trotzdem war ihre Masse so gering, daß es hundert Jahre erfordert haben würde, um eine wägbare Menge zu sammeln, und dann auch nur den dreißigsten Teil eines Milligramms. Sie bewegten sich mit einer Geschwindigkeit, die hunderttausendmal größer war als die Geschwindigkeit von Gewehrkugeln, und sie hatten die größte Geschwindigkeit, die man je an Materie beobachtet hatte, falls sie Materie waren. Und ihr elektrochemisches Äquivalent stimmte nicht mit dem in Flüssigkiten überein, sondern es war einige tausendmal kleiner, d. h. die mit jedem Teilchen der Kathodenstrahlen verbundene Ladung schien im Verhältnis zur Masse tausendmal größer zu sein als die Ladung, die mit einem elektrolytischen Ion, selbst von Wasserstoff, verbunden ist.

Wenn die fliegenden Teilchen wirklich Atome waren, so waren es ganz sicher außerordentlich hoch geladene Atome; war dagegen, was die meisten, die sich mit dem Gegenstand beschäftigten, für wahrscheinlich hielten, die Ladung der fliegenden Teilchen dieselbe wie die Ladung eines Atoms bei der Elektrolyse, so konnte man, vorausgesetzt daß die Experimente richtig ausgeführt und richtig interpretiert waren, nicht umhin anzunehmen, daß die in den Kathodenstrahlen mit der Masse verbundene Ionenladung tausendmal kleiner sei als die Masse eines Wasserstoffatoms; in diesem Fall würden die Kathodenprojektile also die isolierten und bis jetzt hypothetischen Elektronen oder Elektrizitäts-Atome selbst sein. Es würde jedoch sehr übereilt sein, aus einem verhältnismäßig spärlichen Beweismaterial einen Schluß von solcher Tragweite zu ziehen. Der Beweis muß durch andere Gebiete der Physik oder andere Bestimmungen bestätigt werden, die sich auf eine andere Methode stützen; und diese Bestimmungen müssen im Lichte anderer und ganz verschiedener Erscheinungen weiter geprüft werden. Wir wollen zunächst eine Bestimmung beschreiben, die nach einer anderen Methode ausgeführt worden ist, und sodann einige bestätigende Messungen, die man auf Erscheinungen angewandt hat, die ganz anderen Gebieten der Physik angehören.

Weitere Messungen der Kathodenstrahlengeschwindigkeit und des Verhältnisses m/e mit Hilfe elektrostatischer Ablenkung.

Eine andere und vielleicht einfachere Methode für die Bestimmung der beiden Größen u und m/e wurde ebenfalls von J. J. Thomson angewandt; es war sogar die erste Methode, die er anwandte, allein sie war nicht zuverlässig genug, um aus ihr allein einen Schluß zu ziehen. Sie besteht darin, daß man dieselben Strahlen sowohl elcktrostatisch als elektromagnetisch ablenkt, indem man zwei weitere Elektroden, eine über und eine unter den Lauf der Strahlen, in die Vakuumröhre einführt und sie mit den Polen einer Batterie von niedrigem Potential, z. B. einer Batterie von einigen Akkumulatoren verbindet; man erhält

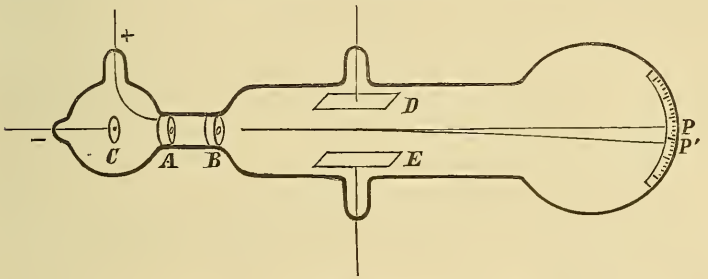


Fig. 4.

Thomsons Apparat für die Beobachtung und Messung der elektrostatischen Ablenkung der Kathodenstrahlen.

so ein vertikales elektrostatisches Feld senkrecht zu den Kathodenstrahlen. Zu gleicher Zeit konnte ein magnetisches Feld, welches durch seitliche Magnetpole oder durch die Kraftlinien eines in einem kreisförmigen Ring fließenden Stromes erzeugt wurde, senkrecht zu den beiden anderen Richtungen angebracht werden. So konnte die elektrostatische Ablenkung mit der magnetischen verglichen oder dazu benutzt werden, die letztere aufzuheben. Da das elektrische Feld eine bestimmte Richtung hat und die Teilchen den Kraftlinien entlang treibt, wirkt es anders als ein magnetisches Feld und bewirkt, daß sich die Teilchen in einer Parabel be-

wegen, ebenso wie die Teilchen eines horizontalen Wasserstrahls unter dem Einfluß der Anziehung der Erde.

J. J. Thomsons Apparat für die Messung der Ablenkung der Kathodenstrahlen, welche durch ein auf ihnen senkrecht stehendes elektrisches Feld bewirkt wird, ist in Fig. 4 abgebildet.[1]) Die von der Kathode C ausgehenden Kathodenstrahlen gehen durch zwei zur Erde abgeleitete Spalte A und B, dann zwischen den elektrisierten Platten D und E hindurch und fallen dann bei P auf das Glas und erzeugen hier einen kleinen, aber lebhaft phosphoreszierenden Fleck. Die Lage dieses Fleckes wird an einer auf die Außenseite des Glases aufgeklebten Skala abgelesen. In einem gewöhnlichen Vakuum wird die Beobachtung des Fleckes durch Schirmwirkung verhindert, weil die vorhandene Luft infolge der durch das Aufprallen der fliegenden Teilchen erzeugten Ionisierung leitend wird; infolgedessen gelang es Hertz nicht, die Ablenkung, welche zu erwarten gewesen wäre, zu erhalten. J. J. Thomson überwand diese Schwierigkeit durch stärkeres Evakuieren, er maß die Ablenkung PP' und benutzte diese Methode zur Messung der Geschwindigkeit und anderer Konstanten der Kathodenstrahlenteilchen.

Durch Beobachtung der Verschiebung des Lichtflecks kann die Ablenkung des dünnen Strahls, der die Strecke l entweder in einem elektrischen Feld von der Stärke E oder in einem magnetischen Feld von der Stärke H durchlaufen hat, direkt gemessen werden.

Wenn u die ursprüngliche Geschwindigkeit der Strahlenteilchen ist, die sich senkrecht zu einem der ablenkenden Felder bewegen, so wird jedes von ihnen eine Zeit l/u haben, während der es wirken kann; und in dieser Zeit wird eine Extrageschwindigkeit w in der Richtung der elektrischen Kraft erzeugt werden, so daß die Änderung der Bewegungsgröße jedes Teilchens in dem einen Fall

$$\frac{mw}{l/u} = \mathrm{E}\,e$$

und im anderen Fall $= \mu\,\mathrm{H}\,e\,u$ ist; wenn also die Ablenkung gering ist, so ist sie

1) *Phil. Mag.*, vol. 44, p. 293, 1897.

$$\vartheta = \frac{w}{u} = \frac{e}{m} \cdot \frac{\mathrm{E}\, l}{u^2}$$

in dem einen Fall und

$$\vartheta' = \frac{e}{m} \cdot \frac{\mu \mathrm{H}\, l}{u}$$

im anderen. Also ist

$$u = \frac{\mathrm{E}}{\mu \mathrm{H}} \cdot \frac{\vartheta'}{\vartheta}$$

und

$$\frac{m}{e} = \frac{l \mu^2 \mathrm{H}^2}{\mathrm{E}} \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta'^2}.$$

Diese Methode gibt, wenn sie anwendbar ist, ziemlich genaue Resultate; und das Ergebnis der Messungen ist, wenn H oder CO_2 oder Luft in der Röhre ist,

$u = 2$ bis 3×10^9 Zentimeter pro Sekunde

und

$\frac{m}{e} = 1{,}1$ bis $1{,}5 \times 10^{-7}$ C. G. S.-Einheiten.

Die Hauptschwierigkeit dieser Methode wird dadurch verursacht, daß die Ionisierung der in der Röhre vorhandenen Luft bewirkt, daß sie vorübergehend leitend wird und infolgedessen die fliegenden Teilchen vor dem elektrischen Einfluß beschirmt. Man hat keine Garantie, daß sie die volle Wirkung des elektrischen Feldes, welches man wirken läßt, empfinden; ja es ist nicht leicht, das Feld überhaupt auf sie wirken zu lassen. Es wurde allgemein angenommen, daß sie für elektrostatische Wirkung überhaupt unempfindlich seien, und dies wurde oft als ein naheliegendes Argument gegen die Ansicht, daß sie elektrisch geladene Teilchen seien, geltend gemacht; aber glücklicherweise vermutete Thomson alsbald, wodurch die zu erwartende einfache Wirkung maskiert wird, und es gelang ihm nachzuweisen, daß unter geeigneten Vorsichtsmaßregeln in einem hinreichend hohen Vakuum die beschirmende ionisierte Atmosphäre entfernt werden und die elektrostatische Ablenkung beobachtet und gemessen werden kann.

Messung der Geschwindigkeit durch gleichzeitige elektrische und magnetische Ablenkung.

Dadurch, daß es möglich ist, die Bahn der fliegenden geladenen Teilchen elektrostatisch abzulenken, ist das Verfahren, welches darin besteht, daß man diese Ablenkung mit der magnetischen kombiniert und gleichzeitig zwei Messungen ausführt, so sehr vereinfacht worden, daß es an die Stelle des zuerst beschriebenen, umständlicheren Verfahrens getreten ist, bei welchem die gesamte Ladung, die gesamte Energie und die magnetische Ablenkung gemessen wird, ein Verfahren, welches ursprünglich für Originalmessungen sehr wertvoll war und auch jetzt noch für Kontrolversuche gute Dienste leistet.

Das einfache Verfahren hat man jetzt auf verschiedene Strahlenarten angewandt, und bevor wir zu komplizierteren Fällen fortschreiten, soll die einfachste Form desselben beschrieben werden. Es besteht darin, daß man 1. den Radius r der Krümmung beobachtet, die durch ein magnetisches Feld von gemessener Stärke H bewirkt wird, und 2. das elektrische Feld E ermittelt, welches senkrecht zum magnetischen Feld wirkend gerade hinreicht, die Ablenkung aufzuheben. Dann gilt für die bei Versuch 1 wirkende Zentrifugalkraft die Gleichung

$$\frac{m u^2}{r} = \mu e \mathrm{H} u$$

oder

$$\frac{m}{e} = \frac{\mu r \mathrm{H}}{u}$$

und für die bei Versuch 2 wirkende ausgleichende Kraft die Gleichung

$$\mathrm{E} e = \mu e \mathrm{H} u,$$

oder

$$u = \frac{\mathrm{E}}{\mu \mathrm{H}}.$$

Aus dem zweiten Versuch ergibt sich die Geschwindigkeit, und aus dem ersten in Kombination mit dem zweiten das elektrochemische Aequivalent.

Die Bestimmung der Geschwindigkeit für den Fall von Teilchen, die alle mit derselben Geschwindigkeit fliegen, ist also sehr leicht; sie ist einfach, in Zentimeter pro Sekunde, das Verhältnis der Stärken des elektrischen und des magnetischen Feldes (beide in E. M.-Einheiten d. h. für $\mu = 1$ ausgedrückt), die gleiche Wirkungen auf die fliegenden Teilchen ausüben und die sich daher, wenn sie in entgegengesetztem Sinne wirken, einander gerade aufheben können.

Bemerkung über Dimensionen.

Um uns zu überzeugen, daß die „Dimensionen" der zuletzt gegebenen Gleichung richtig sind, können wir daran erinnern, daß ein elektrisches Feld von der Dimension

$$\frac{F}{e} = \frac{F}{l\sqrt{\varkappa F}}$$

ist, wenn F Kraft und l Länge ist; und daß ein magnetisches Feld von der Dimension

$$\frac{F}{m} = \frac{F}{l\sqrt{\varepsilon F}}$$

ist; also ist das Verhältnis eines elektrischen Feldes zu einem magnetischen Feld $\sqrt{\mu/\varkappa}$; daher ist der μ-te Teil dieses Verhältnisses $\frac{l}{\sqrt{\mu\varkappa}}$ eine Geschwindigkeit.

Für praktische Zwecke kann die Gleichung in Form einer Proportion geschrieben werden,

$$\frac{\text{Geschwindigkeit des Teilchens}}{\text{Geschwindigkeit des Lichtes}} = \frac{\text{elektrisches Feld in elektrostatischen Einheiten}}{\text{magnetisches Feld in elektromagnetischen Einheiten}},$$

wobei vorausgesetzt wird, daß die Felder so reguliert sind, daß ihre Wirkungen gleich sind.

Wirkung auf Lenardstrahlen.

Eine andere Art der Demonstration wandte Prof. Lenard an, und sie diente ihm dazu, seine Strahlen mit ausgetretenen Kathodenstrahlen zu identifizieren.

Fig. 5 ist Lenards Apparat, mit dem er zeigte, daß seine Strahlen beschleunigt oder verzögert werden, wenn sie in der Richtung der Linien in einem elektrischen Feld zwischen zwei Scheiben a und b hindurchgehen. C ist die Kathode einer Lenardröhre ähnlich wie die in Figur 1, und die Strahlen treten durch ein Aluminiumfenster bei A ein und gehen von da durch

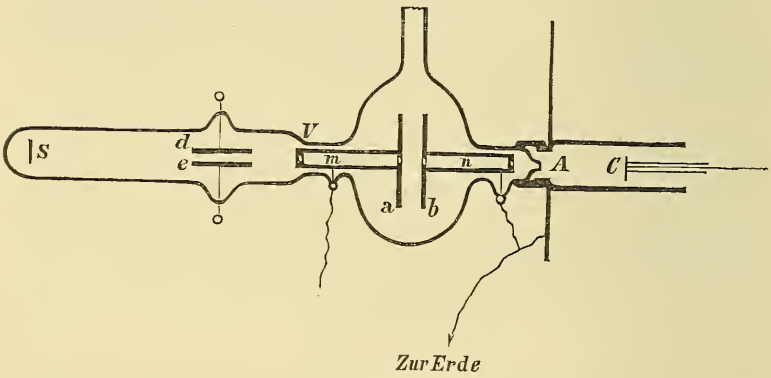


Fig. 5.

Lenards Apparat zur Veranschaulichung des Einflusses eines longitudinalen elektrischen Feldes auf die Geschwindigkeit der Kathoden- oder Lenardstrahlen.

eine zur Erde abgeleitete Röhre n nach einer der geladenen Scheiben. Die Scheiben sind durchbohrt, um die Strahlen durchzulassen; sie gehen weiter durch eine zweite Röhre m, die nebst den Scheiben auf einem hohen Potential gehalten wird, und dann zwischen den Platten d und e hindurch, die entweder ein elektrisches oder ein magnetisches Feld repräsentieren; schließlich fallen sie auf einen phosphoreszierenden Schirm S und erzeugen auf diesen einen Lichtfleck. Die Beobachtung besteht darin, daß man die Änderung der Lage dieses Flecks verfolgt, wenn das Zeichen der Elektrisierung der Platten a und b geändert wird; denn wenn das longitudinale Feld die Geschwindigkait ändert,

so wird auch die durch das Feld *d e* bewirkte Ablenkung geändert und hierdurch ist die Aenderung der Geschwindigkeit erwiesen.

Direkte Bestimmung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen.

Ein höchst sinnreicher Apparat, der von Wiechert benutzt wurde, um nach einem von Des Coudres angegebenen Verfahren die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen zu bestimmen, während

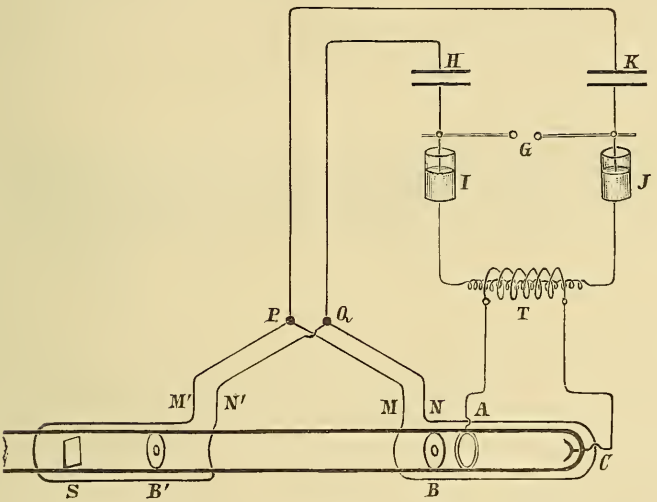


Fig. 6.

Wiecherts Apparat zur direkten Messung der Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen während des Durchgangs durch eine Röhre.

sie die Achse einer evakuierten Glasröhre von mäßiger Länge durchliefen, wird durch Fig. 6 und Fig. 7 veranschaulicht.

Die Röhre enthält an dem einem Ende eine konkave Kathode C, welche die Strahlen in einer Öffnung des Schirmes B vereinigt; von hier gehen sie weiter und treffen einen zweiten durchlöcherten Schirm B′; der zentrale Teil der Strahlen fällt schließlich auf einen Schirm S.

Die Röhre wird durch einen Teslaschen Induktionsapparat T

erregt, dessen Pole beziehungsweise mit der Kathode C und der Ringanode A verbunden wird.

Die Leidener Flaschen I und J können durch einen Ruhmkorffschen Apparat oder in anderer Weise erregt werden und entladen sich durch die Funkenstrecke G. Dabei wird ein weiterer Wechselstromkreis von sehr hoher Frequenz, der durch die Kondensatoren H und K charakterisiert und auf die Region oberhalb der Funkenstrecke G beschränkt ist, in Tätigkeit gesetzt; eine oszillatorische Entladung wird nach den symmetrischen Klemmen P und Q geleitet, von wo aus sie zwei parallel geschaltete Drahtschleifen MN und M′N′ durchlaufen kann. Die Wirkung des in dieser Weise in der Schlinge MN (Fig. 7) erzeugten alternieren-

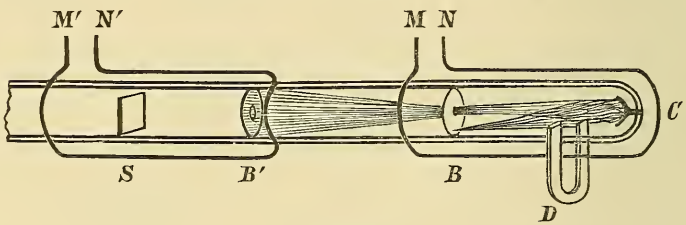


Fig. 7.

Vergrößerter Teil von Fig. 6 zur Veranschaulichung der Schwingungen der Kathodenstrahlen unter dem Einfluß eines Wechselstroms sowie der Regulierung der Schwingungsweite durch einen festen Magnet.

den Feldes besteht darin, daß die Kathodenstrahlen schnell hin- und herschwingen, so daß sie nur in der Mitte ihres Weges durch die Öffnung in der Scheibe B hindurchgehen. Die Wirkung auf den phosphoreszierenden Schirm ist dann ganz schwach. Läßt man aber einen permanenten Magnet D auf die Strahlen wirken, so werden sie abgelenkt und die Schwingungen können, wie in der Figur angedeutet ist, auf die Region zwischen dem Mittelpunkt und den Umfang der Scheibe beschränkt werden; es geht dann eine größere Anzahl von Strahlen durch die Öffnung und der Schirm wird heller leuchtend als in Abwesenheit des Magnets, weil sich die Öffnung jetzt am Ende der Schwingung der oszillierenden Strahlen befindet. Wenn der Magnet zu stark ist, so wird der Schirm S dunkel, weil die oszillierenden Strahlen zu

stark abgelenkt werden. Man kann daher die *Phase* der oszillierenden Strahlen in dem rechten Teil der Röhre ziemlich genau angeben, wenn man den Schirm S beobachtet und die Stärke des Magnets reguliert.

Wir gehen jetzt dazu über, den linken Teil der Röhre oder vielmehr die beweglichen Teile zu betrachten, die auf der linken Seite der Figuren 6 und 7 abgebildet sind. Auch hier haben wir in M′N′ einen oszillierenden Strom genau in derselben Phase stehender Schwingung wie in dem anderen Zweig MN; wenn daher die Strahlen zum Durchlaufen der Röhre keine Zeit brauchten, so würden diejenigen, welche durch die Scheibe B′ hindurchgehen, abgelenkt werden wie vorher; wenn aber die zum Durchlaufen der Röhre erforderliche Zeit einem Viertel der Schwingungsperiode des Kondensators HK entspricht, so werden die Strahlen, welche in dem andern Zweig des Stromkreises das Maximum der Ablenkung erreicht haben, in dem zweiten überhaupt nicht abgelenkt und sie erreichen infolgedessen die Mitte des Schirmes.

Durch Änderung der Schwingungsfrequenz oder des Abstandes der mit B und B′ bezeichneten Teile ist es möglich, die Ablenkung so zu regulieren, daß sie auf der linken Seite entweder in derselben oder in der entgegengesetzten Phase ist wie auf der rechten, oder daß sie Null erster, zweiter oder dritter Ordnung ist

Der Versuch ist, wie man sich denken kann, ein schwieriger, aber es gelang Wiechert doch, in dieser Weise die Geschwindigkeit der unter gegebenen Umständen erzeugten Kathodenstrahlen zu messen.

Leider ist diese Geschwindigkeit nicht konstant wie die Lichtgeschwindigkeit; sie hängt allerdings nicht von der Natur des Gases in der Röhre ab, auch nicht von der Substanz der Elektroden, aber sie variiert mit der Dichtigkeit des noch vorhandenen Gases und mit der Intensität des elektrischen Feldes.

Um die Diffusion und Ausbreitung der Strahlen während ihres Durchgangs durch die Röhre zu verhindern, wurde sie in eine longitudinale magnetisierende Spirale eingeschlossen, um die Strahlen längs der Achse zu konzentrieren.

Wenn u die zu messende Geschwindigkeit und l die Strecke ist, die sie durchlaufen, um die erste Null zu geben, so ist

$u = 4\,n\,l$, wenn n die Frequenz der elektrischen Oszillationen in dem Stromkreis MN ist.

Bei einem Versuch war l gleich 39 Zentimeter, und n war 32 Millionen pro Sekunde; hieraus ergibt sich für n der Wert 4.5×10^9 Zentimeter pro Sekunde.

Sobald die Geschwindigkeit bekannt ist, kann das Verhältnis e/m durch Messung der magnetischen Ablenkung der Strahlen bestimmt werden. Die Zuverlässigkeit dieser Bestimmung, wie sie von Wiechert ausgeführt wurde, schwankt zwischen 1,55 mal und 1,01 mal 10^7 Diese Methode der Messung kann wohl kaum als die genaueste betrachtet werden, aber sie verdient als direkte und scharfsinnige Methode Beachtung.

6. Kapitel.

Bestimmung des elektrochemischen Aequivalents durch die Entladung in ultraviolettem Licht.

Dasselbe Verhältnis von *m* zu *e* oder ein Verhältnis von ganz vergleichbarer Größe erhält man aus Erscheinungen, die auf den ersten Blick ganz anderer Natur zu sein scheinen.

Eine dieser Erscheinungen ist die Wirkung des ultravioletten Lichtes bei der Entladung negativer Elektrizität von einem blanken Metall oder einer anderen Oberfläche. Diese Erscheinung wurde von Hertz entdeckt und namentlich von Righi und von Elster und Geitel untersucht. (Siehe einen der Anhänge in meinem Buche: „Signalling without Wires", erschienen im Verlag der Electrician Co.) Wenn ultraviolettes Licht, einerlei ob es von einem Funken oder von einer Flamme kommt, auf eine negativ geladene Oberfläche fällt, so entweicht in der Regel Elekrizität von dieser Oberfläche. Diese Elektrizität kann von jedem Körper aufgenommen werden, welcher dem beleuchteten gegenübersteht, und kann zum Laden eines Elektrometers von bekannter Kapazität benutzt und so gemessen werden. Der Verfasser hat unter Beihilfe von Herrn Benjamin Davies zahlreiche Versuche über diese Erscheinung ausgeführt, die aber noch nicht veröffentlicht sind. Nun machten Elster und Geitel die bemerkenswerte Entdeckung, daß die Entladungsgeschwindigkeit durch einen Magnet je nach der Richtung seiner Kraftlinien beeinflußt wird. Diese Erscheinung ließ vermuten, daß die Linien, in deren Richtung der Elektrizitätsverlust stattfindet, durch den Magnet abgelenkt werden, und Righi zeigte, daß diese Linien ganz bestimmte Bahnen bilden und daß die Entladung ähnlich wie bei den Kathodenstrahlen in dem Fortschleudern negativ geladener Teilchen besteht. Ein Vakuum ist nicht nötig,

um die Wirkung zu beobachten, aber im Vakuum ist der Effekt deutlicher und genauer meßbar. Der Unterschied zwischen diesem Vorgang und dem in einer gewöhnlichen Vakuumröhre besteht darin, daß hier keine große E.M.K. oder kein großer Potentialgradient wirksam ist, so daß die Erscheinung nicht den Charakter einer disruptiven Entladung hat. Es tritt nicht eher ein Elektrizitätsverlust ein, als bis — vermutlich infolge der synchronen Schwingungen des ultravioletten Lichtes — die Moleküle in einen Zustand heftiger Bewegung versetzt sind und der Zusamenhang zwischen dem Metalle und der negativen Ladung oder negativ geladenen Korpuskeln gelockert ist.

Zwei Dinge sind nötig, um zu bewirken, daß sich die Teilchen von der Platte entfernen; sie müssen durch das Auffallen von ultraviolettem Licht gelockert werden — dabei hat die Richtung der Polarisation dieses Lichtes einen wesentlichen Einfluß wenn die Oberfläche glatt ist — und die Oberfläche auf welcher sie sich befinden muß ebenfalls negativ geladen sein, um sie abzustoßen. Weder Licht allein noch Elektrisierung allein bringt eine beträchtliche Wirkung hervor; beides muß zusammenwirken. Licht allein kann eine schwache positive Elektrisierung verursachen[1]), indem es bewirkt, daß negative Korpuskeln hinwegdiffundieren, ein Vorgang, der durch Einwirkung eines Luftstromes befördert wird. Ob Elektrisierung allein eine wahrnehmbare Wirkung hervorbringt, hängt von der Temperatur des Metalls ab. Wenn sie hoch ist, so ist wie Guthrie entdeckt hat, die Elektrisierung wirksam.

J. J. Thomson ersann eine höchst sinnreiche Methode, diesen Versuch — die Entladung vermittelst ultravioletten Lichtes in metrischer Weise auszuführen und aus ihm das elektrochemische Aequivalent der geladenen Teilchen, d. h. die Menge der Materie abzuleiten, die jedes Teichen im Vergleich mit seiner elektrischen Ladung enthält. Zu diesem Zwecke benutzte er die gewöhnliche Anordnung, bestehend aus einer kleinen negativ geladenen Zinkplatte, auf welche das ultraviolette Licht einer entfernten Bogenlampe fallen konnte; das Licht ging durch eine Quarzplatte und

1) Dieser Effekt wurde gleichzeitig von Righi und Hallwachs entdeckt. Siehe *Phil. Mag*, 1888, April, p. 314, und Juli, p. 78.

dann durch ein Drahtgewebe, welches mit einem Elektrometer verbunden war. Der Abstand zwischen der Zinkplatte und dem Drahtgewebe war veränderlich, und der Versuch bestand darin, daß beobachtet wurde, wieviel Elektrizität von der negativ geladenen Platte das Drahtgewebe unter dem Einfluß des Lichtes erreichte, und zwar erstens in Abwesenheit und zweitens in Anwesenheit eines magnetischen Feldes von gemessener Stärke in der Region zwischen der Platte und dem Drahtgewebe.

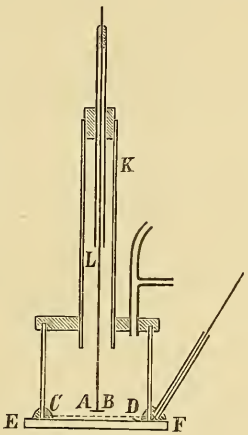


Fig. 8.

J. J. Thomsons Apparat zum Messen der magnetischen Ablenkung der elektrischen Ladung, die ein blankes negatives Metall im Vakuum unter dem Einfluß ultravioletten Lichtes ausstrahlt. Die negative Elektrode ist eine blanke Zinkplatte *AB*, die gehoben und gesenkt werden kann, die andere ist Drahtgewebe *CD*, welches mit einem Elektroskop verbunden ist. Ultraviolettes Licht tritt durch die Quarzplatte *EF* ein, und dann wird ein magnetisches Feld erregt.

Eine höchst einfache Rechnung ergab, daß die Bahnen der fliegenden Teilchen unter dem Einfluss des magnetischen Feldes *Zykloiden* sind, deren erzeugende Kreise sowohl das Verhältnis m/e als auch das Verhältnis E/H^2 enthalten, d. h. wenn die Bahn der Teilchen beobachtet werden könnte, so würde sie das verlangte elektrochemische Aequivalent enthalten, ebenso das Verhältnis des elektrischen Feldes zu dem magnetischen Feld und auch die absolute Stärke des magnetisches Feldes.

Die Berechnung ist so einfach, daß sie hier gegeben werden mag:

Wir wollen annehmen, die Zinkplatte und das Drahtgewebe in Fig. 9 ständen einander dicht gegenüber und der Potentialgradient zwischen ihnen sei $(V—V')/d=E$; ferner nehmen wir an, daß ein magnetisches Feld von der Dichte H (mit diesem Buch-

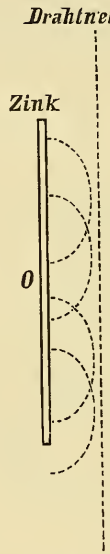


Fig. 9.

Die Figur veranschaulicht die theoretischen Bahnen der von einer negativ geladenen Zinkplatte unter dem Einfluß eines starken senkrechten magnetischen Feldes in ultraviolettem Licht ausgesandten Elektronen; das Zink und das Drahtgewebe sind eine Vergrößerung der Teile *AB* und *CD* in Fig. 8. Die Strahlen würden natürlich das Drahtgewebe erreichen und einen Strom nach dem Elektrometer führen, aber unter dem Einfluß des magnetischen Feldes werden ihre Bahnen Zykloiden und sie würden das Drahtgewebe nur erreichen, wenn es mehr angenähert würde. Der kritische Abstand zwischen dem Zink und dem Drahtgewebe, wenn das letztere gerade von den Zykloiden erreicht werden würde, ist die Größe, welche gemessen wird.

staben bezeichnen wir der Kürze halber das μ-fache der Intensität) senkrecht zur Ebene der Zeichnung wirkt.

Dann ist die Bewegung eines von der Platte losgelösten und aus seiner ursprünglichen Lage in die Region zwischen den Platten fortgeschleuderten Teilchens, vorausgesetzt, daß die Platten

im Vakuum sind, so daß kein widerstehendes Medium im Spiel ist — wenn wir die x-Achse senkrecht zur Platte annehmen — gegeben durch die Gleichungen

$$m\ddot{x} = \mathrm{E}e - \mathrm{H}e\dot{y}$$
$$m\ddot{y} = \mathrm{H}e\dot{x};$$

dabei sind die Anfangswerte von x, y, $\dot{x}$ und $\dot{y}$ sämtlich gleich Null.

Die Auflösung dieser Gleichungen, unter diesen Anfangsbedingungen, ist

$$x = a(1 - \cos bt)$$
$$y = a(bt - \sin bt).$$

Also ist

$$a = \frac{\mathrm{E}m}{\mathrm{H}^2 e} \text{ und } b = \mathrm{H}\frac{e}{m}$$

und hieraus ersehen wir, daß x einem Sinus versus gemäß zwischen 0 und $2a$ oszilliert, während y sowohl oszillatorisch als fortschreitend ist, wobei es seine Periode in der Zeit $\frac{2\pi}{b}$ vollendet und in jeder solchen Periode um den Betrag von $2\pi a$ zunimmt. Mit anderen Worten, die Gleichungen repräsentieren eine Zykloide, die vom Umfang eines auf der Zinkplatte rollenden Kreises vom Radius a beschrieben wird.

Es gibt kein Mittel, diese ganz unsichtbare und rein theoretische Bahn wirklich zu beobachten; wenn man aber beachtet, daß dieser Theorie gemäß alle Teilchen zwischen den Platten ähnliche Bahnen beschreiben — soweit sie nicht in die Nähe des Randes einer der beiden Platten kommen, in welchem Falle sie nicht so weit fortgeschleudert werden würden — so wird es klar, daß eine kritische Entfernung existieren muß, innerhalb deren das Drahtgewebe *alle* Teilchen auffangen würde und außerhalb deren nicht ein einziges imstande sein würde, es zu erreichen. In der Figur ist das Drahtgewebe so gezeichnet, daß es sich gerade außerhalb der kritischen Entfernung befindet, so daß es keine Elektrizität empfangen würde, trotzdem die Zinkplatte von ultraviolettem Licht beschienen wird, aber so daß es in das

Bereich der nach der Theorie in Zykloiden fliegenden Teilchen gelangen und eine reichliche Ladung bekommen würde, wenn entweder der Abstand von der Zinkplatte vermindert würde oder wenn das elektrische Feld verstärkt oder das magnetische Feld geschwächt würde. Und die kritische Entfernung, in welcher dies geschehen würde — was leicht experimentell zu beobachten ist — würde unabhängig von der Helligkeit des ultravioletten Lichtes und einfach gleich dem Durchmesser des erzeugenden Kreises sein. Mit anderen Worten, die kritische Entfernung der beiden Platten voneinander würde, wenn eine Übertragung elektrischer Ladung stattfindet, gleich $2a$ oder $\frac{2mE}{eH^2}$ sein, eine Größe, welche demnach durch dieses sinnreiche Mittel gemessen werden kann. Daher kann das Verhältnis m/e für diesen Fall experimentell bestimmt werden, wenn E und H beide bekannt sind. Der hierzu benutzte Apparat ist in Fig. 8 abgebildet.

Es zeigte sich, daß die wirkliche experimentelle Beobachtung der kritischen Entfernung infolge störender Einflüsse nicht so scharf war, wie es diese einfache Theorie erwarten ließ; einer dieser Einflüsse wurde von der noch vorhandenen Luft ausgeübt, indem sie die freie Weglänge der bewegten Teilchen beeinflußte. Dennoch war die Beobachrung scharf genug, um eine Bestimmung von e/m zu ermöglichen, und der gefundene Wert war auch in diesem Fall gleich 10^7 oder genauer 7×10^6 C. G. S.-Einheiten, was mit dem von J. J. Thomson gefundenen und von Lenard und Kaufmann bestätigten Werten für die Kathodenstrahlenteilchen gut übereinstimmt.

Eine andere Erscheinung, über welche Messungen ausgeführt wurden war die Entladung negativer Elektrizität von einem Kohlenfaden in einer Atmosphäre von verdünntem Wasserstoff. Auch diese wird, wie Elster und Geitel gezeigt haben, durch ein magnetisches Feld beeinflußt; und eine Reihe von Messungen, die in ähnlicher Weise wie die vorher genannten ausgeführt wurden, lieferten den Wert

$$\frac{e}{m} = 8{,}7\times10^6 \text{C. G. S.},$$

also einen Wert von derselben Größenordnung wie vorher; er ist tausendmal so groß, als der elektrochemische oder elektro-

lytische Wert für Wasserstoff und vieltausendmal größer als für andere Substanzen, aber immer konstant und unabhängig von der Natur der anwesenden Substanz.

Eine andere, mehr direkte Methode, wurde von Professor Lenard ausgebildet und wird durch Fig. 10 veranschaulicht. Der bemerkenswerte Charakter dieser Experimente besteht darin, daß bei denselben nichts sichtbar ist, man sieht weder Kathodenstrahlen noch einen phosphoreszierenden Fleck; alles was beobachtet werden kann, ist das Maximum der Ablenkung des Elektrometers, wie bei dem Verfahren von Lenard, oder eine Nullablenkung, die plötzlich in eine endliche Ablenkung übergeht.

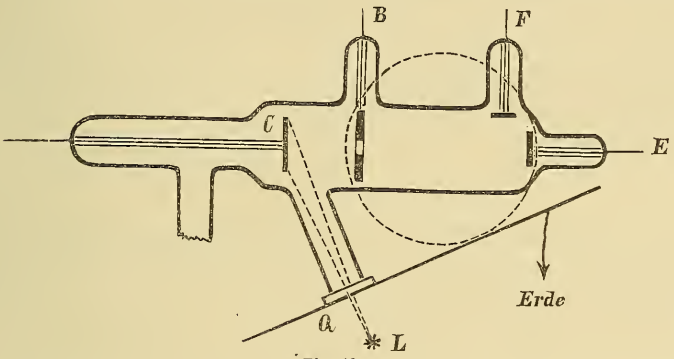


Fig. 10.

Lenards Apparat für die Messung des elektrochemischen Aequivalents der Entladung negativer Elektrizität von einer Kathode, die im Vakuum durch ultraviolettes Licht beleuchtet wird.

Die Methode von Lenard mag in folgender Weise beschrieben werden:

Licht von der Quelle L, einem Funken zwischen Zinkelektroden, tritt durch eine Quarzplatte Q in das Vakuum ein und fällt auf eine negativ geladene Aluminiumplatte C. B ist ein zur Erde abgeleiteter durchbohrter Schirm; die Teilchen fliegen durch die Öffnung in diesem Schirm und fallen auf die Platte E, welche mit einem Elektrometer verbunden ist; wenn sie durch einen Magnet abgelenkt werden, so fallen sie auf die Platte F. Die Ladungen dieser beiden Elektroden werden getrennt gemessen und als Ordinaten mit dem magnetischen Feld als Abszisse

zusammengestellt. Die Ladung von E nimmt ab und die von F nimmt zu, wenn das magnetische Feld stärker wird, bis bei F ein Maximum erreicht wird; dies tritt ein, wenn der Mittelpunkt der Platte die Mitte des Strahlenbüschels bildet. Eine weitere Steigerung der magnetischen Kraft bewirkt, daß die empfangene Ladung abnimmt. Das Feld, welches erforderlich ist, um dieses Maximum zu geben, wird gemessen, und zwar durch Ausmessung der erhaltenem Kurve. Die Bahnen der Teilchen zwischen B und F müssen Kreise sein, da sie nur einer ablenkenden Kraft ausgesetzt sind, wenn sie durch den Schirm durchgegangen sind. Wenn die Platte F das Maximum erreicht hat, so geht die Tangente an den mittleren Kreis horizontal durch die Öffnung B; dies zusammen mit dem Umstand, daß diese kreisförmige Bahn durch den Mittelpunkt der Platte F geht, ist hinreichend, diese Bahn zu bestimmen und also ihren Krümmungsgradius angeben zu können; dieser ist gleich

$$\frac{mu}{e\mathrm{H}}$$

Die Geschwindigkeit u wird besonders geschätzt, indem man annimmt, daß sie unter dem elektrischen Einfluß zwischen C und B erreicht wird; die Gleichung ist

$$\frac{1}{2}mu^2 = e(\mathrm{V}-\mathrm{V}');$$

der letztere Faktor ist die Potentialdifferenz zwischen C und B.

So sind die beiden Größen u und e/m bestimmt.

Positive und negative Träger.

Im Zusammenhang mit den angeführten Experimenten ist es wichtig, zu beachten, daß der obige Wert vom e/m für die negativen Träger nur bei *niedrigen Drucken* erhalten worden ist. Wenn der Druck hoch ist, so kann der gewöhnliche elektrolytische Wert von e/m oder ein noch etwas kleinerer erhalten werden; und dies deutet darauf hin, daß bei gewöhnlichen Drucken das Elektron dadurch belastet wird, daß es sich an ein Atom anhängt oder daß es eine Gruppe von Atomen um sich sammelt. Für diese Annahme spricht weiter der Umstand, daß nur ein

geringer Unterschied zwischen der Geschwindigkeit der positiven und der negativen Ionen ist, wenn sie von einem elektrischen Feld in einem Gas bei gewönlichem Luftdruck in Bewegung gesetzt werden. Es wird sich später zeigen, daß die Geschwindigkeit der vom Radium entladenen Elektronen so groß ist, daß diese Belastung unmerklich ist.

Für das Verhältnis e/m haben die *positiven* Träger nie einen größeren als den gewöhnlichen elektrolytischen Wert gegeben. Diese sind nicht so leicht zu beobachten, allein Wien [1]) hat sie untersucht, indem er die geringe magnetische Ablenkung entdeckte und maß, welche gewisse Strahlen hinter einer durchbohrten Kathode in einer Vakuumröhre zeigen, die Goldstein entdeckte und Kanalstrahlen nannte, und die wie Wien und Ewers gezeigt haben, Träger positiver Elektrizität sind. Wien hat gezeigt, daß sie sich ziemlich schnell bewegen — ungefähr 360 Kilometer in der Sekunde — trotz des Umstandes, daß in Wasserstoff ihr Verhältnis e/m von der Ordnung 10^4 also gleich dem Wert für ein Atom oder Ion Wasserstoff ist. Bei anderen Substanzen ändert sich für diese positiv geladenen Atome das Verhältnis mit der Substanz und ist annähernd gleich dem elektrolytischen Wert. Auch J. J. Thomson hat vermittelst der Entladung von glühenden Drähten und anderen positiv geladenen Körpern Messungen der Geschwindigkeit der positiven Träger ausgeführt und Wiens Resultate bestätigt gefunden, indem er für das elektrochemische Aequivalent einen elektrolytischen Wert fand.

Diese Tatsachen machen es im höchsten Grade wahrscheinlich, daß die positiven Elektrizitätsträger immer *Ionen* sind, die aus einer mit einem Atom verbundenen positiven Ladungseinheit bestehen, daß dagegen die negativen Träger zuweilen von der Hauptmasse des Atoms losgelöst sind und so zusagen nur Bruchteile oder Fragmente eines Atoms bilden. Diese isolierten und frei umherfliegenden Träger negativer Elektrizität können eine ungeheure Geschwindigkeit annehmen. Jede Beschleunigung der sie ausgesetzt sind, ist tausendmal größer als selbst die Beschleunigung eines Wasserstoffatoms, welches mit einer trägen Masse belastet ist, wenn dieses derselben beschleunigenden Kraft ausgesetzt ist.

1) Wied. *Ann.* 65 p. 440. Siehe auch Ewers in Wied. *Ann.* 69 p. 187.

Man vergegenwärtige sich die Geschwindigkeit, mit der sich ein Teilchen unter dem Einfluss der Schwerkraft bewegen würde, wenn es nur $\frac{1}{1000}$ der entsprechenden Masse zu tragen hätte. Ein solches Teilchen würde unter dem Einfluß der Schwerkraft nicht wie jeder Körper in der Nähe der Erdoberfläche, 16 Fuß, sondern 16000 Fuß oder ungefähr drei Meilen fallen, und es würde unter dem Einfluß der Schwerkraft in einer Sekunde eine Geschwindigkeit von 6 Meilen erreichen, die fast hinreichen würde, es dem Bereiche der Anziehung der Erde zu entziehen, und die mehr als hinreichend sein würde, es um die Erde herumzuführen, wenn es mit einer solchen Geschwindigkeit horizontal abgeschossen würde.

Die Beschleunigung, welcher Teilchen in einer Vakuumröhre ausgesetzt sind, ist noch weit größer als diese, da hier die Kräfte so ungeheuer groß sind; die Wirkung der Schwerkraft auf Ionen ist fast unendlich klein im Vergleich mit der Wirkung der gewöhnlichen elektrischen Kraft auf ihre Ladungen. Wir wollen z. B. annehmen, sie befänden sich in einem Feld, wie es in einer Vakuumröhre leicht vorkommen kann, von 3000 Volt pro Zentimeter oder 10 elektrostatischen Einheiten, ein Zehntel von dem, was gewöhnliche Luft aushalten kann. Die Kraft, welche auf einen dieser Träger wirkt, ist dann $10 \times 10^{-10} = 10^{-9}$ Dyn; wenn die Masse, welche bewegt wird, ein ganzes Atom Wasserstoff ist, wenn sie z. B. ein positiver Träger in einer Wasserstoffatmosphäre wäre, so ist sie nur 10^{-24} Gramm; und demgemäß ist die Beschleunigung, welche sie erleidet, 10^{15} Zentimeter pro Sekunde oder das Millionenfache von g. Wenn sie aber ein negativer Träger der kleinsten Art wäre, so würde ihre Beschleunigung noch tausendmal größer sein.

Die Geschwindigkeit, welche erreicht wird, wenn unter dem Einfluß dieser Kraft eine Strecke von 5 Zentimeter zurückgelegt wird, erhält man, wenn man die Quadratwurzel aus $2\,fh$ zieht; sie ist also 10^8 Zentimeter pro Sekunde für einen positiven Träger und 3×10^9 Zentimeter pro Sekunde für einen negativen Träger; und dies sind annähernd die wirklich beobachteten Größenordnungen.

So wird mehr und mehr die Hypothese gerechtfertigt, daß die positiven Ladungseinheiten in Operationen, die wir kontro-

lieren können, immer mit Atomen verbunden und folglich immer vollständige Ionen sind; dagegen treten die negativen Ladungseinheiten in manchen Fällen isoliert existierend auf, — vielleicht einen Teil eines Atoms mit sich führend, in welchem Falle sie als Korpuskeln bezeichnet werden können, die einen materiellen Kern besitzen; vielleicht reine körperlose Elektrizität, was diese auch sein mag — eine von der Materie abgesonderte elektrische Ladung, nur eine Komplexität in Aether, in welchem Falle sie jenem hypothetischen Wesen entsprechen würden, die in theoretischer und mathematischer Behandlung als „Elektronen“ bezeichnet werden.

7. Kapitel.

Ionisierung von Gasen.

Es ist fortwährend notwendig, von der Luft oder einem anderen Medium zu sagen, es sei durch den Durchgang von Strahlen und durch manche andere Prozesse „ionisiert". Es soll damit gesagt sein, daß die Moleküle in ihre Atome zerfallen sind, die entgegengesetzt geladen sind und beziehungsweise Anionen und Kationen bilden. Es scheint dies die Folge des Zusammentreffens eines energisch fliegenden Teilchens mit einem verhältnismäßig stationären Molekül zu sein; eine plötzliche elektrische Welle oder eine Pulswelle, wenn sie dünn und kräftig genug ist, kann dieselbe Wirkung hervorbringen; in allen Fällen besteht die Wirkung darin, daß das Molekül in die Ionen, aus denen es besteht, zerfällt, von denen einige positiv und einige negativ geladen sind, wobei das Gas in einen wahren gasförmigen Elektrolyten verwandelt wird, so lange bis die dissoziirten Atome Zeit gehabt haben sich wieder zu vereinigen, eine Zeit, die nach Minuten gemessen werden kann. Auf dieser Wirkung beruht es, daß X-Strahlen so leicht ein Elektroskop oder einen anderen geladenen Körper zu entladen vermögen, einerlei welches das Vorzeichen der Ladung ist; denn es ist klar, daß die Ionen von entgegengesetztem Vorzeichen, die in der Atmosphäre vorhanden sind, von ihm angezogen werden und daß durch diese jede Ladung, die er besitzen mag, neutralisiert wird. Ionisierte Luft kann immer daran erkannt werden, daß sie Elektroskope entladet, auch wenn die Isolierung durch die festen Teile desselben fehlerfrei ist.

Das Ionisierungsvermögen der X-Strahlen wurde kurz nach ihrer Entdeckung von Righi und fast gleichzeitig von anderen Physikern beobachtet.

Die atmosphärische Luft in Freien ist gewöhnlich mehr oder weniger ionisiert, und in der Luft in unterirdischen Räumen ist die Ionisierung noch stärker, wahrscheinlich infolge der Radioaktivität in dem Erdboden. Elster und Geitel haben diese Verhältnisse eingehend studiert und Lenard fand, daß selbst aufschlagendes Wasser Ionen in die Luft einführt, so daß die Luft am Fuße eines Wasserfalles gewöhnlich mehr oder weniger ionisiert ist.

Verhalten heißer Metalle in Gasen.

In Fig. 11 ist ein Apparat abgebildet, mit welchem eine große Menge wichtiger Untersuchungen über die durch Hitze bewirkte

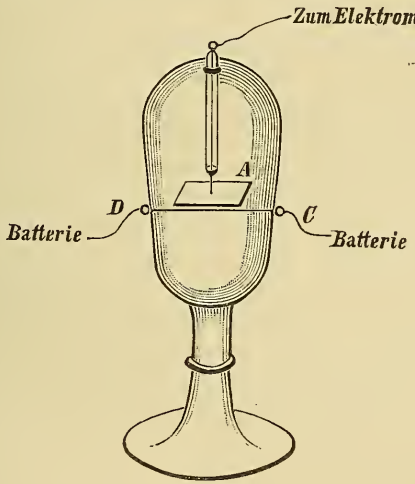


Fig. 11.

Ionisierung und Desaggregation verschiedener Substanzen ausgeführt worden sind; es ist der einfache Apparat von Elster und Geitel, durch den sie sehr eingehend eine Anzahl glühender Metalle in Form von Draht oder Band untersuchten, die durch einen elektrischen Strom in verschiedenen Gasen erhitzt wurden, J. J. Thomson verwendete bei diesen Versuchen einen Strom, der in der Sekundärspule eines Transformators erzeugt wurde, so daß er bequem isoliert werden konnte. Die Einzelheiten sind

kompliziert, und muß wegen dieser auf J. J. Thomsons Buch *The Conduction of Electicity through Gases* verwiesen werden; es mag aber kurz gesagt sein, daß, wenn das Gas in dem Gefäß Luft ist, die Metallplatte A eine positive Ladung erhält, wenn der Draht auf dunkle Rotglut erhitzt wird; wenn er heißer wird, so nimmt die Ladung zu, bis der Draht gelbglühend ist; wenn er noch heißer wird, so wird die Ladung kleiner und bei den höchsten Temperaturen ist sie sehr gering. In Wasserstoff wird die Platte negativ elektrisch, wenn der Draht heiß genug ist, während er bei niedrigerer Temperatur positiv elektrisch wird. Um okkludierte Gase auszutreiben, hielt J. J. Thomson den Draht oft eine Woche und noch länger auf Rotglut. Mc Clelland, Branly, H. A. Wilson und andere haben diese Erscheinung untersucht; in einer anderen Form wurde sie von Preece und Fleming studiert, die eine eigentümliche Beobachtung weiter verfolgten, die Edison an Glühlampen gemacht hatte. Neuere Messungen von O. W. Richardson haben viel dazu beigetragen, die Erscheinung aufzuklären. Daß ein glühender Platindraht zerfällt, jedenfalls Material abgibt, geht aus der von Aitken entdeckten Tatsache hervor, daß in einem Lichtstrahl eine Wolke sichtbar wird, wenn das feuchte Gas, welches den Draht umgibt, plötzlich abgekühlt wird. Dies kann bei viel niedrigerer Temperatur als bei Glühhitze stattfinden. Owen (*Phil. Mag.*, Sept. 1903) fand, daß wenn sich ein Platindraht in Luft befindet, immer einer Wolke entsteht, wenn die Temperatur des Drahtes auf ungefähr 300 ° C gesteigert wird, selbst nachdem er vorher lange Zeit auf Weisglut erhitzt worden war; in reinem Wasserstoff dagegen mußte der Draht auf Rotglut erhitzt werden, bevor sich eine Wolke bildete.

Messung des Ionisierungsstroms.

Die Theorie der Dissoziation oder des Zerfalls der Moleküle, ein Vorgang, welcher in Gasen durch Röntgenstrahlen, durch die Radiumemanation und eine große Anzahl anderer Einflüsse hervorgerufen wird, — ein Vorgang der als Ionisierung bezeichnet wird, weil die Bruchstücke der Moleküle entgegengesetzt geladen sind, ist zu umfangreich, als daß wir uns hier damit eingehend beschäftigen könnten. Sie ist von einer großen Anzahl von Forschern ausgearbeitet worden,

und eine Zusammenstellung der Ergebnisse dieser Arbeiten findet der Leser in J. J. Thomsons *„Discharge of Electricity through Gases.* Es mag nur hervorgehoben werden, daß die Zersetzungsprodukte zwar im ersten Augenblick ohne Zweifel einfache Ionen sind, aber alsbald dadurch kompliziert werden, daß sich andere Moleküle um sie herum ansammeln; infolgedessen wird die Diffusion oder die fortschreitende Bewegung dieser Ionen leicht verzögert, und wenn sie gemessen wird, so ergeben sich geringere Werte als man sonst hätte erwarten sollen. Im allgemeinen streben die negativen Ionen sich schneller zu bewegen als die positiven, aber der Unterschied ist nicht notwendigerweise größer als bei der Elektrolyse von Flüssigkeiten beobachtet werden kann. Neuere Untersuchungen von H. A. Wilson und E. Gold über die Leitung in Flammen haben jedoch ergeben, daß die negativen Träger in diesem Falle freie Elektronen sind.

Sehr leicht ausführbar ist die Messung des Leitungsvermögens der Luft in diesem ionisierten Zustand, d. h. die Ermittelung des gesamten Stromes, der zwischen zwei Elektroden übergeführt wird, die in die ionisierte Luft eingetaucht und mit einem hinreichend empfindlichen Messinstrument verbunden sind. Das Instrument kann in manchen Fällen ein Galvanometer, in anderen ein Elektrometer sein, durch welches ein Elektrizitätsverlust gemessen werden kann.

So kann ein Sättigungswert des Stromes gefunden werden, bei welchem alle anwesenden Ionen an der Wirkung beteiligt sind; der Strom erreicht dann ein Maximum, welches nicht überschritten werden kann; die Stärke dieses Stromes würde ein Mittel bieten, die Anzahl der anwesenden Ionen zu schätzen, wenn die Geschwindigkeit und die Ladung jedes einzelnen Ions bekannt wäre. Messungen des Gesamtstromes $N e u$, der pro Sekunde übergeführten Elektrizitätsmenge, sind von Lenard[1]) und Righi[2]) und Thomson[3]) und in verschiedenen Gasen von Rutherford[4]), jetzt Professor in Montreal, ausgeführt worden; ferner

1) Wied. *Ann.* 63. p. 253.
2) *Rend. della R. Accad. dei Lincei,* Mai, 1896.
3) *Phil. Mag.,* November 1896.
4) Daselbst, November 1896 und April 1897.

von Beattie [1]) und de Smolan in Glasgow, von Zeleny [2]) in Minnesota, von Mc Clelland [3]) über heiße Flammengase, von Mc Lennan [4]) in Toronto, von Richardson [5]), H. A. Wilson [6]) und Owen [7]) über glühende Drähte. Auch Townsend hat zahlreiche Versuche über die Diffusionsgeschwindigkeit von Ionen ausgeführt.

Professor Zeleny maß die Geschwindigkeit nach einer zuverläßigen und direkten Methode, indem er die Teilchen durch eine Röhre gegen einen Wind strömen ließ und die Geschwindigkeit des Luftstromes beobachtete, welche gerade hinreichte, das Fortschreiten der Teilchen zu verhindern; diese Messungen bilden eine befriedigende Bestätigung der von Thomson und Rutherford auf mehr indirektem Wege erzielten Resultate.

Versuche über Verdichtung von Feuchtigkeit.

C. T. R. Wilson ermittelte den Grad der Expansion, welcher bei positiven und bei negativen Ionen erforderlich ist, damit diese als Kerne bei der Verdichtung von Feuchtigkeit wirken. Die Ionen wurden durch Röntgenstrahlen erzeugt, und in das Gefäß waren Elektroden eingelassen, um die Trennung der Ionen zu bewirken. Er fand, daß bei einer Ausdehnung von 1 Volum auf 1,25 Volume ein Nebel in derjenigen Hälfte des Gefäßes entstand, welche die negativen Ionen enthielt; in derjenigen Hälfte, welche die positiven Ionen enthielt, war kaum etwas von Kondensation zu bemerken, wenn aber das Expansionsverhältnis 1,31 war, so war wenig oder gar kein Unterschied zwischen den beiden Hälften zu bemerken. Hiermit war bewiesen, daß die negativen Ionen als Konzentrationszentren für Wasserdampf wirksamer waren, als die positiven Ionen.

Es ist zweifelhaft, ob die Elektronen selbst als Kerne zu wirken und Wasserdampf um sich zu verdichten vermögen, und

---

1) *Phil. Mag.*, Juni 1897.
2) Daselbst, Juli 1898.
3) Daselbst, Juli 1898.
4) *Phil. Trans.*, 195. p. 49, 1899.
5) Daselbst 201, 1903.
6) Daselbst 202, 1903.
7) *Phil. Mag.*, August 1904.

es ist nicht wahrscheinlich. daß sie dies ohne Hilfe eines oder mehrerer Atome Materie tun können. Hierüber hat mir Herr C. T. R. Wilson in folgender Weise seine Ansicht ausgesprochen:

„Ich glaube sicher, daß in fast allen Fällen das Elektron bereits durch Belastung in ein Ion umgewandelt ist, ehe die Expansion, durch welche die erforderliche Übersättigung hervorgebracht wird, bewirkt worden ist. In Luft, die weniger Feuchtigkeit enthält als einer vierfachen Übersättigung entspricht, wird wahrscheinlich Gleichgewicht erreicht, wenn das Elektron eine Gruppe von Molekülen um sich gesammelt hat, die nicht größer ist als das Ion in trockener Luft. Wenn dagegen eine vierfache Übersättigung überschritten wird, so werden die Zustände unbeständig und der Haufen Moleküle wächst zu einem sichtbaren Tropfen an. Wenn Elektronen unmittelbar nach einer Expansion in die Expansionskammer eintreten, während die vierfache Übersättigung noch überschritten ist, so bilden sie ohne Zweifel Kerne für die Kondensation von Tropfen, ohne eine Unterbrechung beim Ionenstadium. Bei den Versuchen mit ultraviolettem Licht sind aber nach meiner Ansicht ohne Zweifel alle Elektronen oder wenigstens bei weitem der größte Teil derselben belastet und haben schon als Ionen existiert, bevor die Expansion ausgeführt wurde".

Das nächste Kapitel enthält einen Bericht über Versuche, die vielleicht als die wichtigsten bezeichnet werden können, die jemals im Cavendish-Laboratorium gemacht worden sind.

8. Kapitel.

Bestimmung der Masse eines Elektrons.

Bisher haben alle Messungen des Wertes von e/m für Leitung und Strahlung in Gasen gut übereinstimmende Resultate geliefert; und die Messungen an Kathodenstrahlen in einer Crookesschen Röhre oder an einer Platte, die durch ultraviolettes Licht entladen wird, haben ebenfalls einen zuverläßigen Wert für die Geschwindigkeit dieser Strahlen geliefert und zu dem Ergebnis geführt, daß sie je nach Umständen ungefähr ein Dreißigstel der Lichtgeschwindigkeit ist. Es fragt sich nun weiter, wie sich die Größen e und m einzeln ermitteln lassen. Diese Messungen sind mit großen Schwierigkeiten verbunden, da wir es mit einem Aggregat einer ungeheueren und unbekannten Anzahl dieser Körper zu tun haben. Wenn eine Wand in einer gewissen Zeit von N Projektilen getroffen wird, so würde es nicht schwierig sein, die Gesamtmasse $N\,m$ derselben durch die Wärme, die sie beim Aufschlagen erzeugen, zu ermitteln, oder villeicht noch besser durch die Bewegungsgröße, die sie einem nach Art eines ballistischen Pendels beweglichen Arm erteilen, vorausgesetzt, daß ihre Geschwindigkeit u wie in dem vorliegenden Falle bekannt ist. Die Gesamtenergie $\frac{1}{2}\,N\,m\,u^2$ oder die gesamte Bewegungsgröße $N\,m\,u$ könnte also gefunden werden; aber es fragt sich, wie sich m von N trennen läßt.

Es würde ferner nicht schwierig sein, die Teilchen in einem hohlen Gefäß, welches mit einem Elektrometer von bekannter Kapazität verbunden ist, aufzufangen und die Gesamtmenge Elektrizität zu bestimmen, welche in einer gegebenen Zeit in das Gefäß eintritt, d. h. $N\,e$ zu bestimmen; aber es fragt sich dann wieder, wie sich e von N trennen läßt.

Etwas anderes, was sich verhältnismäßig leicht bestimmen läßt, namentlich in solchen Fällen wie Entladung einer negativen Oberfläche unter der Einwirkung von ultraviolettem Licht oder die durch Röntgenstrahlen bewirkte Leitungsfähigkeit der Luft, ist der gesamte Strom, d. i. die Elektrizitätsmenge Neu, die in der Luft pro Sekunde von der einen nach der andern Elektrode geht, während diese auf einer hinreichend hohen Potentialdifferenz gehalten werden, um zu bewirken, daß alle anwesenden Korpuskeln oder Ionen an der Stromleitung teilnehmen.

Die folgenden Größen sind sowohl im Cavendish-Laboratorium, als auch in anderen Laboratorien bestimmt worden und die Methoden, nach denen diese Bestimmungen ausgeführt worden sind, sind in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben worden:

e/m
u
Ne
Nm
Neu

Wir haben aber bis jetzt noch keine Methode beschrieben, wie sich e oder m getrennt messen läßt, sondern nur Methoden, wie das Verhältnis dieser beiden Größen gemessen werden kann.

Wenn es jetzt möglich wäre die Korpuskeln oder Elektronen zu *zählen,* die Zahl N derselben zu ermitteln, die in das hohle Gefäß eintreten oder die bei der Entladung durch ultraviolettes Licht an der Strombewegung beteiltigt sind, so wären wir, was den wirklichen Wert von e und m betrifft, nicht mehr auf Vermutungen angewiesen, sondern wir hätten diese Werte wirklich bestimmt.

Diese glänzende Untersuchung wurde von Professor J. J. Thomson ausgeführt, und zwar vermittelst einer Methode, die zum Teil von C. T. R. Wilson herrührt und die eine Ergänzung einer Tatsache bildet, die von Aitken entdeckt und im Lichte hydrodynamischer Prinzipien interpretiert wurde, die lange vorher von Sir George Stokes aufgestellt worden waren.

Man wird es entschuldigen, wenn ich etwas enthusiastisch über diesen Punkt rede; er bildet nach meiner Ansicht eine der glänzendsten neueren Leistungen auf dem Gebiete des Experimentalphysik. Ja ich würde das Wort „neueren“ in diesem Satz

zu streichen bereit sein, wenn es nicht für einen Zeitgenossen etwas gewagt wäre, dem zukünftigen Geschichtsschreiber vorzugreifen, der die Sache auders auffassen kann.

Um den Gegenstand erschöpfend darzustellen, muß ich etwas weit ausholen und dabei will ich eine Reihe von Punkten einzeln behandeln.

Aitken und Wolkenkerne.

John Aitken [1]) in Edinburg entdeckte im Jahre 1880, daß Wolken- oder Nebelkügelchen nicht ohne feste Kerne entstehen können, so daß in vollkommen klarer und staubfreier Luft Wasserdampf sich nicht verdichtet und kein Nebel entsteht. Siehe z. B. meine Vorlesung über „Staub“ auf der British Association in Montreal, 1884. *Nature*, 31, 268).

In reiner staubfreier Luft können Dämpfe übersättigt werden; wenn aber ein Kern eingeführt wird, so tritt sofort Kondensation ein, und je größer die Anzahl der Kerne oder Konzentrationszentren ist, desto größer ist die Anzahl der Wolkenkügelchen.

Jedes Wolken- oder Nebelkügelchen ist ein winziger fallender Regentropfen, der keineswegs schwimmt, sondern durch ein wiederstehendes Medium fallt; er fällt zwar langsam, weil sein Gewicht im Vergleich mit seiner Oberfläche so unbedeutend ist, aber er fällt unter allen Umständen in Bezug auf die Luft. Eine Wolke kann leicht durch einen Luftstrom emporgetragen werden, aber nur deshalb, weil sich die Luft schneller aufwärts bewegt als die Tropfen durch sie abwärts sickern. Die Bewegung der Luft stört nicht die *relative* Fallbewegung. Die absolute Bewegung in Bezug auf die Erdoberfläche ist die Resultante der beiden.

Daß zur Ausscheidung von Nebel Kerne erforderlich sind, läßt sich dadurch beweisen, daß man sie aus der Luft entfernt, indem man diese durch Baumwolle filtriert. Wenn die Anzahl der Kerne geringer wird, so nimmt die Nebelbildung einen anderen Charakter an; schließlich entsteht ein sogenannter schottischer Nebel, wie er in sehr reiner Luft entsteht; es sind dann wenig Staubteilchen und also auch wenig Konzentrationszentra

1) *Trans. R. S. Edin.*, 30, 337—368 (1883).

vorhanden und infolgedessen hat jedes von ihnen eine beträchtliche Dampfmenge zu verdichten. Daher sind die Tropfen nicht so nahe zusammen, aber sie sind größer und fallen schneller, wie ein feiner Regen. In vollkommen staubfreier Luft kann der Taupunkt weit überschritten werden, ohne daß eine Verdichtung von Dampf stattfindet, und die Luft bleibt vollkommen durchsichtig, trotzdem sie mit Dampf übersättigt ist.

Die Wirkung der Verdichtungskerne und die Notwendigkeit ihrer Anwesenheit findet ihre Erklärung durch Lord Kelvins Theorie des Einflusses der Krümmung auf die Spannung des Wasserdampfes [1]). Je stärker nämlich die Oberfläche einer Flüssigkeit gekrümmt ist, desto mehr strebt die Flüssigkeit zu verdampfen, und ein Tröpfchen von unendlich kleiner konvexer Oberfläche würde sich augenblicklich in Dampf umwandeln. Infolgedessen kann ein unendlich kleines Kügelchen einer Flüssigkeit nicht existieren; Dampf kann sich nur auf einer Oberfläche von endlicher Krümmung verdichten, oder auf einem Staubteilchen oder einem anderen Körper, der aus einen Aggregat zahlreicher Atome besteht. Man muß nämlich bedenken, daß ein einziges Körnchen Lykopodiumpulver ungefähr eine Trillion Atome enthält, während ein Staubteilchen, welches dick genug ist um Dampf zu verdichten, nicht mehr als eine Billion, ja vielleicht nicht mehr als eine Million Atome zu enthalten braucht; es braucht nicht einmal so dick zu sein, daß man es mit einem Mikroskop sehen könnte. Es ist jedoch groß genug, um durch ein Baumwollfilter zurückgehalten zu werden.

J. J. Thomson und Elektrische Kerne.

Im Jahre 1888 zeigte J. J. Thomson in seinem Buche *Applications of Dynamics to Physics and Chemistry*, p. 164, daß die Elektrisierung eines Körpers den Einfluß der Krümmung zum Teil neutralisiert und daher die Verdichtung von Dampf auf einer konvexen Oberfläche befördert.

Bei einem Tropfen Flüssigkeit oder einer Seifenblase besteht die Wirkung der Krümmung der Oberfläche darin, daß sie eine nach innen gerichtete radiale Komponente der Oberflächenspan-

1) Siehe z. B. *Maxwells Theory of Heat*, 1891. p. 290.

nung erzeugt, die einen erhöhten inneren Druck zur Folge hat. Die Wirkung der Elektrisierung ist genau die entgegengesetzte; sie bewirkt einen nach außen gerichteten Druck, die sogenannte elektrische Spannung.

Diese Drucke hängen in folgender Weise von der Größe der Kugel ab.

Die radiale Komponente der Oberflächenspannung T ist

$$\frac{2\,T}{r} \text{ nach innen.}$$

Die elektrische Spannung ist

$$2\,\pi\,\varkappa\,\sigma^2 = \frac{e^2}{8\,\pi\,\varkappa\,r^4} \text{ nach außen.}$$

Sie werden also von der Größe des Kügelchens in verschiedener Weise beeinflußt; sie müssen sich daher bei irgend einer Größe gegenseitig aufheben, und eine solche elektrisierte konvexe Oberfläche wird sich so verhalten, als ob sie nicht elektrisiert aber eben wäre. Infolgedessen wird Dampf, der sich an einer nicht elektrisierten konvexen Oberfläche erst weit unterhalb des Taupunktes verdichten würde, sich bei hinreichender Elektrisierung zu verdichten anfangen, sobald der Taupunkt erreicht ist.

Die kritische Größe, bei welcher die Ionenladung eine Wasserkugel befähigt, was Verdichtung betrifft, so zu wirken, als ob sie eben wäre, kann berechnet werden, indem man den Druck gleich der Spannung setzt:

$$\frac{2\,T}{r} = \frac{e^2}{8\,\pi\,\varkappa\,r^4}$$

$$\text{oder } r^3 = \frac{e^2}{16\,\pi\,\varkappa\,T} = \frac{10^{-21}}{50 \times 80} = \frac{1}{4} \times 10^{-24} \text{ ccm};$$

r ist also annähernd 10^{-8}, also von atomistischer Größe.

Es ist also zu erwarten, daß Ionen Dampf beim gewöhnlichen Taupunkt verdichten und jede Masse, die größer ist und dieselbe Ladung hat, kann ihn noch leichter verdichten.

Daher befördert eine elektrische Ladung die Verdichtung des Dampfes, und eine hinreichende elektrische Ladung kann bewirken, daß er sich auf einem ganz kleinen Körper verdichtet, selbst auf einem Körper, der nicht größer ist als ein Atom. In Gegenwart von Ionen sind also für die Kondensation Staubteilchen nicht erforderlich. Dampf kann sich auf diesen elektrischen Kernen verdichten, ohne daß die Anwesenheit von festen Körpern von endlicher Krümmung erforderlich ist. Die elektrischen Kerne können nicht durch Baumwolle vollständig abfiltriert werden; sie können in staubfreier Luft existieren oder entstehen. Beim Durchgang durch große Mengen Metallgewebe kann sich ihre Anzahl wohl vermindern, aber ganz verschwinden können sie nur durch ihre eigne Diffussion, die es ihnen schließlich ermöglicht, sich paarweise zu vereinigen oder nach den Wänden des Gefäßes zu wandern. Sie können aber sehr schnell durch ein elektrisches Feld, d. h. durch Elektroden entfernt werden, die auf einer Potentialdifferenz von einigen Volt gehalten werden. Sie setzen sich dann sofort in Bewegung, wie bei der Elektrolyse, nur mit viel größerer Geschwindigkeit, weil ihre Bewegung viel weniger Widerstand findet und weniger durch Zusammenttöße beeinflußt wird; sie erreichen daher alsbald die Elektroden und setzen sich an diesen fest, und in diesem Falle kann wieder kein richtiger Nebel entstehen. Aber man darf nicht vergessen, daß irgend eine von den zahlreichen Ursachen der Ionisierung etwas Nebel erzeugen kann.

Wenn Ionen in beträchtlicher Anzahl anwesend sind, so entsteht ein dicker Nebel, wenn der Raum mit Dampf gesättigt ist, aber es ist ein Nebel von anderem Ansehen als die schwache regenartige Kondensation, die sich um die wenigen übrigbleibenden Staubteilchen bildet. Die Nebelkügelchen sind in der Regel von gleichförmiger Größe, und diese Größe läßt sich näherungsweise aus den Beugungsfarben ableiten, die man sieht, wenn man einen Lichtpunkt durch den Nebel hindurch betrachtet. Ein zuverlässiges Resultat erhält man jedoch in dieser Weise nicht [1]).

Elektrische Kerne lassen sich in verschiedener Weise erzeugen, durch jedes Mittel, welches die Luft dissoziiert oder sie mit

1) Siehe C. T. R. Wilson, *Phil. Trans.* 1897, A. Vol. 189, p. 283.

Ionen anfüllt. Einige werden durch auffallendes Wasser gebildet, andere werden von Flammen und wieder andere von rotglühenden Körpern abgegeben; sie entstehen in beträchtlicher Anzahl, wenn Röntgenstrahlen oder wenn Becquerelstrahlen durch die Luft gehen; sie können von radioaktiven Substanzen, z. B. Uran abgegeben werden, und sie werden leicht von einer negativ geladenen Metalloberfläche ausgesandt, die durch ultraviolettes Licht beleuchtet wird.

Wilsons Versuche über Wolkenbildung.

C. T. R. Wilson [1]) konstruierte bei seinen im Cavendish-Laboratorium ausgeführten Untersuchungen über Wolkenbildung unter dem Einfluß von Röntgenstrahlen usw. einen Apparat, der es ermöglichte, eine bestimmte und bekannte Menge Wasserdampf in sichtbarer Form zu verdichten. Dies geschah dadurch, daß gesättigte Luft plötzlich oder adiabatisch um einen genau gemessenen Betrag ausgedehnt wurde. Der verwendete Apparat ist in Figur 12 abgebildet.

Eine Probierröhre, welche sich in einer anderen bewegt, dient als Kolben, und der Apparat war so eingerichtet, daß man den Kolben plötzlich fallen lassen und hierdurch eine gemessene geringe Evakuierung bewirken und infolgedessen das Gefäß, welches die zu untersuchende Luft enthält, abkühlen konnte. Die Luft war mit Dampf gesättigt und mit elektrischen Kernen beladen. Der Nebel entstand sofort und die Tropfen begannen in der gewöhnlichen Weise langsam zu fallen. Wilson versuchte die Größe der Tropfen nach den Beugungsfarben zu schätzen, was aber mit Schwierigkeiten verbunden war und zu keinem befriedigenden Ergebnis führte. Wäre die Größe der Tropfen bekannt gewesen, so wäre auch ihre Anzahl bekannt gewesen, da die gemessene Expansion eine bekannte Abkühlung unter den Taupunkt bewirkt und also eine bekannte Menge Wasserdampf kondensiert hatte, der sich gleichförmig auf sämtliche gleiche Kügelchen verteilt hatte.

J. J. Thomson vermutete, daß sich die Größe der Tropfen besser durch Beobachtung ihrer Fallgeschwindigkeit schätzen lassen

1) *Phil. Trans.* A. 1897, Vol. 189, p. 265.

würde; diese ist leicht zu beobachten, weil die Tropfen alle gleich schnell fallen, da sie von gleicher Größe sind. Es ist leicht, das Zusammenfallen eines Nebels unter einer Glasglocke zu be-

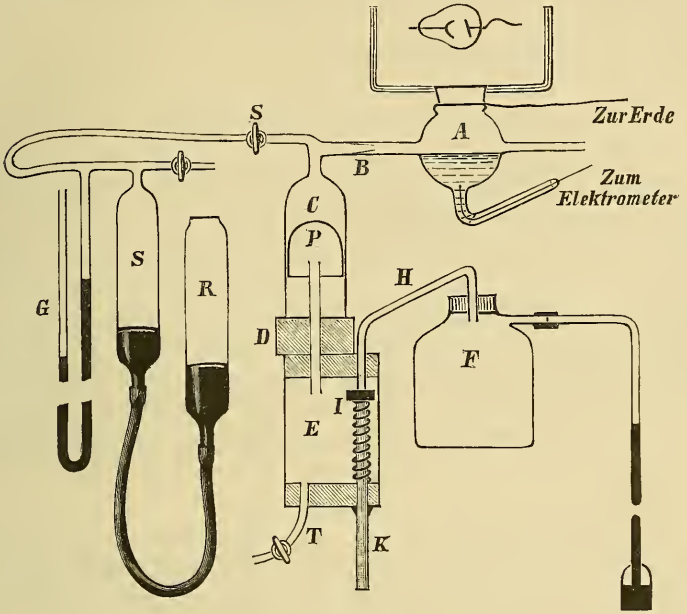


Fig. 12.

A ist eins der Gefäße, in denen der Nebel entsteht, dessen Fallgeschwindigkeit nach Wilsons Methode gemessen werden soll; es ist so eingerichtet, daß die Ionisierung durch X-Strahlen bewirkt werden kann. Das Gefäß *A*, welches etwas Wasser enthält und mit einer zur Erde abgeleiteten Aluminiumplatte bedeckt ist, steht durch die Röhre *B* mit dem Gefäß *C* in Verbindung. Die dünnwandige Probierröhre *P* (in der Figur etwas zu kurz gezeichnet) dient als Kolben und ist mit dem unteren Rand wie ein Gasometer in Wasser eingetaucht. *D* ist ein Gummistopfen, der die Röhre *C* verschließt; der untere Teil der Röhre *C* ist, was in der Figur nicht angedeutet ist, bis zu einer solchen Höhe mit Wasser gefüllt, daß der Rand des Kolbens sich immer im Wasser befindet. Eine Glasröhre verbindet das Innere der Probierröhre *P* mit einem Raum *E*. Der Raum *E* kann mit einem evakuierten Raum *F* durch die Röhre *H* in Verbindung gesetzt werden. Das Ende der Röhre *H* in dem Raume *E* ist eben abgeschliffen und durch einen Gummistopfen *I* verschlossen, der durch eine Spiralfeder gegen die Röhre *H* gedrückt wird. Der Stopfen *I* ist an einem Stab *K* befestigt; wenn der Stab rasch nach unten gezogen wird, so wird der Druck in der Probierröhre vermindert und der Kolben *P* fällt schnell bis er gegen den Gummistopfen *D* stößt. Infolgedessen dehnt sich das Gas in *A* aus; vermittelst der Röhren *R* und *S* kann der Grad der Expansion geändert werden. Vor einer Expansion wird der Kolben *P* gehoben, indem man durch den Hahn *T* Luft zuläßt und dann den Hahn schließt. Wenn alles vorbereitet ist, wird *K* herabgezogen und in *A* entsteht die Wolke.

obachten, indem man auf seine scharf begrenzte Oberfläche achtet, über welcher eine klare Schicht entsteht, die während des Fallens der Wolke immer dicker wird. Die Geschwindigkeit, mit der die Oberfläche der Wolke fällt, ist die Fallgeschwindigkeit der einzelnen Kügelchen, aus denen sie zusammengesetzt ist. Dies führt uns zu dem folgenden Punkt.

Prof. Stokes und fallende Kugeln.

Vor vielen Jahren, im Jahre 1849, diskutierte Sir George G. Stockes [1]) die Bewegung fester Körper durch Flüssigkeiten, unter anderem die Bewegung einer Kugel unter dem Einfluß ihres eigenes Gewichtes in einer zähen Flüssigkeit. Es ist eine bekannte Tatsache, daß große Körper durch Luft oder Wasser oder ein anderes widerstehendes Medium schneller fallen als kleine Körper von derselben Gestalt. Grober Sand z. B. setzt sich im Wasser schneller ab als feiner Sand, und das feinste Pulver braucht sehr lange Zeit um sich abzusetzen; die Verschiedenheit der Fallgeschwindigkeit findet praktische Anwendung bei der Operation des Schlämmens, um körniges Material nach der Korngröße zu trennen.

Dasselbe findet in der Luft statt; große Regentropfen fallen schnell, kleine Regentropfen langsam und kleine Nebeltröpfchen so langsam, daß ihre Bewegung kaum wahrzunehmen ist, aber alle diese Bewegungen befolgen dieselben Gesetze, solange sie nicht zu heftig sind und solange der fallende Körper keine Kanten hat, durch die während des Fallens Wirbelbewegungen erzeugt wurden. Eine langsam fallende Kugel, die nur durch die Zähigkeit ohne Wellen oder Wirbel beeinflußt wird, bildet den einfachsten Fall. Sie erreicht alsbald eine Endgeschwindigkeit, d. h. diejenige Geschwindigkeit, bei welcher der Widerstand der Flüssigkeit mit dem Gewicht der Kugel gerade im Gleichgewicht ist. Bei dieser Geschwindigkeit ist die resultierende Kraft gleich Null, so daß die Kugel nach dem ersten Bewegungsgesetz sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit bewegt [1]). Diese konstante Geschwindigkeit wurde von Sir George Stokes für einen fallenden Regen-

1) *Camb. Trans. Phil. Soc.*, 9, 48.
2) Vgl. *Nature*, 31, 266.

tropfen vom Radius r berechnet; sie ist gegeben durch die Formel

$$c = \frac{2}{9} \frac{G \varrho r^2}{\text{Zähigkeit d. Luft}}.$$

Hier bedeutet ϱ der Überschuß der Dichtigkeit der Kugel über die Dichtigkeit des Mediums, in welchem sie sich bewegt, vorausgesetzt, daß kein endliches Gleiten an der Oberfäche stattfindet. Der größte Einfluß dieses Gleitens, der sich in einem gewissen Grade geltend macht, wenn die fallenden Kügelchen sehr klein sind, besteht darin, daß die mögliche Endgeschwindigkeit anderthalbmal so groß ist; der Koeffizient $\frac{2}{9}$ muß also in diesem Falle durch $\frac{1}{3}$ ersetzt werden.

Diese einfache Formel gibt den Zusammenhang an zwischen der Fallgeschwindigkeit eines kleinen Regen- oder Nebeltropfens und seiner Größe; und durch Beobachtung dieser Geschwindigkeit ist es daher möglich, wenn man die Zähigkeit der Luft kennt, die Dimensionen der fallenden Tropfen zu berechnen.

J. J. Thomsons Zählversuch.

Jetzt sind wir in der Lage, den Versuch zu verstehen, welcher ausgeführt werden muß[1]), um die Ionen zu zählen, welche in Luft unter dem Einfluß won Röntgenstrahlen entstehen oder die durch Beleuchtung einer negativ geladenen Oberfäche mit ultraviolettem Licht erzeugt werden. Der Apparat für den ersteren Fall ist in Figur 12 abgebildet. Die ionisierenden X-Strahlen treten in die Kammer A von oben her durch einen luftdicht schließenden Aluminiumdeckel ein, der zur Erde abgeleitet ist.

Die Geschwindigkeit der Entladung, welche beobachtet werden muß, um Neu zu berechnen, wird ermittelt, indem man das Wasser und die Aluminiumplatte mit den Klemmen eines Elektrometers verbindet und diese auf einer hinreichenden Potentialdifferenz hält.

Wenn dann durch die Expansionsvorrichtung Kondensation bewirkt, und Nebel erzeugt wird, so kann die Geschwindigkeit mit der er nach und nach fällt, beobachtet werden, indem man

1) *Phil. Mag.* Dezember 1898 und Dezember 1899.

durch das Gefäß nach einer beleuchteten Fläche blickt; aus der Geschwindigkeit ergibt sich nach dem Satz von Stokes die Größe jedes einzelnen Kügelchens. Die Menge des Wassers, aus dem die Kügelchen entstanden sind, ergibt sich aus der gemessenen Größe der Expansion in einer Weise, die ich hier nicht in ihren Einzelheiten beschreiben will; so kann die Anzahl dieser Kügelchen und folglich auch die Anzahl ihrer Kondensationszentren oder Kerne oder Ionen bestimmt werden.

Wenn c die beobachtete Fallgeschwindigkeit in ruhender Luft ist, so sind die linearen Dimensionen der fallenden Tropfen

$$r = \sqrt{\frac{9\,\mu\,c}{2\,g\,\varrho}} = \sqrt{\frac{4{,}5 \times 0{,}00018}{981}}\; c \text{ Zentimeter.}$$

In einem Falle war der beobachtete Wert von c gleich 0,14 cm pro Sekunde; also war in diesem Falle das Volumen des einzelnen Tropfens

$$\frac{4}{3}\,\pi\, r^3 = 1{,}6 \times 10^{-10} \text{ ccm};$$

wenn also die Gesamtmenge des Wassers in allen Tropfen in einem gegebenen Raume aus dem gemessenen Betrage der adiabatischen Ausdehnung, welche die Abkühlung und Ausscheidung bewirkte, berechnet wird, so können die Tropfen gezählt werden.

Einige Monate später wiederholte Professor Thomson den Versuch; diesmal wurden die Ionen durch Beleuchtung einer negativ geladenen Zinkplatte mit ultraviolettem Licht erzeugt. Der benutzte Apparat ist in Fig. 13 abgebildet. Einer blanken Zinkplatte stand im *Vakuum* ein durchsichtiger Leiter gegenüber durch den das Licht auf die Platte fallen konnte, sowie eine Quarzplatte, durch die das Gefäß luftdicht verschlossen war, so daß es evakuiert werden und dann der Einwirkung des ultravioletten Lichtes ausgesetzt werden konnte. Dieser Apparat war anstatt des Gefäßes A mit dem Expansionsapparat von Fig. 12 verbunden.

Es müssen zahlreiche Vorsichtsmaßregeln beobachtet werden, da eine schwache Wolke auch entstehen kann, ohne daß Elektronen

oder absichtlich erzeugte Kerne anwesend sind. Positive Ionen und andere zufällige oder nicht absichtlich hervorgerufene Kerne können, wenn sie vorhanden sind, mit Hilfe ihres abweichenden Verhaltens eliminiert werden. Eine Differentialbeobachtung ist im allgemeinen notwendig; auch muß dafür gesorgt werden, daß alle beabsichtigten Kerne zur Geltung kommen und nicht nur ein Teil derselben.

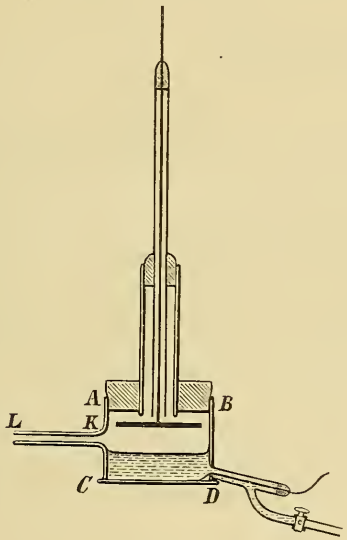


Fig. 13.

J. J. Thomsons Hilfsapparat für den Zählversuch. Ultraviolettes Licht geht durch die Quarzplatte *CD* und durch eine Schicht Flüssigkeit, welche die Luft gesättigt hält und welche die eine Elektrode bildet, nach einer blanken Zinkplatte *K*, die die andere Elektrode bildet und negativ geladen ist. Durch die Röhre *L* ist dieses Gefäß mit dem in Fig. 12 abgebildeten Expansionsapparat verbunden. Dann wird die plötzlich gemessene Expansion vorgenommen; es wird ein Nebel um die negativen Ionen kondensiert, die durch das ultraviolette Licht erzeugt worden sind, und dann wird die Geschwindigkeit gemessen, mit der die Wolke sinkt.

Die Anzahl der Tropfen, welche bei einem einzelnen Versuche in dieser Weise gefunden wurden, war ungefähr 30,000 pro Kubikzentimeter; die Gesamtmenge Wasser, aus der sie entstanden waren, war ungefähr zwei Hundertstel eines Milligrammes. Die Anzahl der Tropfen ist natürlich gleich der Anzahl der Kerne. Auf diese Weise hat man also die Kerne gezählt.

Ergebnis.

Durch dieses sinnreiche Zählverfahren ist die absolute Ladung und die absolute Masse eines Elektrons direkt ermittelt. Bisher hatten wir nur auf verschiedenen Wegen das Verhältnis e/m und die Geschwindigkeit u bestimmt. Ebenso waren wir imstande, Neu und Ne und Nmu^2 zu bestimmen. Jetzt haben wir schließlich auch N bestimmt und können daher die Werte von e und m einzeln berechnen.

Für e ergibt sich, wie man vermutete, in allen Fällen die gewöhnliche Ionenladung von der Größenordnung von 3×10^{-10} elektrostatischen oder 10^{-20} elektromagnetischen Einheiten. Daher ist für positive Träger und für alle Ionen m die den anwesenden Atomen zukommende Masse oder in einigen Fällen infolge der Bildung von Molekularaggregaten größer als diese. Für negative Träger dagegen, die durch ultraviolettes Licht erzeugt werden, sowie für andere Fälle, in denen $e/m = 10^7$ ist, sind die Massen von der Größenordnung 10^{-27} Gramm, also umgefähr gleich $\frac{1}{100}$ der kleinsten und leichtesten Menge von Materie, welche bis dahin bekannt war, nämlich des Wasserstoffatoms.

Hiermit war die Existenz von Massen, die kleiner als Atome sind, experimentell nachgewiesen und eine Entdeckung von epochemachender Bedeutung gemacht worden.

9. Kapitel.

Weitere Einzelheiten über Elektronen und Ionen.

Bestätigende Messungen der Ladung.

Eine bestätigende Messung der Ladung e kann in der Weise ausgeführt werden, daß man zuerst die Fallgeschwindigkeit einer Wolke beobachtet, die um die als Kerne wirkenden Ionen verdichtet worden ist — die Messung liefert das Gewicht w des einzelnen Tropfens — und dann auf die Wolke ein vertikales elektrisches Feld wirken läßt und dessen Stärke so reguliert, bis es gerade hinreicht, das Sinken der Tropfen zu verhindern. Unter diesen Bedingungen ist $w = \mathrm{E}\, e$, und da alle Größen außer e gemessen sind, so ist auch e bekannt. Dieses sinnreiche Verfahren verdanken wir Herrn H. A. Wilson, der es im *Philosophical Magazine* vom April 1903 beschrieben hat. In der Praxis verfährt man etwas anders als angegeben und benutzt eine einfache Differentialmethode. Wilson fand für e den Wert $3{,}1 \times 10^{-10}$. Hieraus ergab sich zugleich, daß das Gesetz von Stokes auch in denjenigen Fällen anwendbar ist, in denen man das *Fallen* der Wolke zugelassen hatte.

Dies ist, wie es scheint, der Wert der elektrischen Ladung für jedes beliebige positive oder negative Ion und ebenso für die isolierten Elektronen. Derselbe Wert charakterisiert selbst die Molekularaggreate, die oft in leitender Luft oder anderen Gasen vorkommen.

H. A. Wilsons Apparat, der dazu diente, eine Wolke gegen die Schwerkraft durch ein bekanntes elektrisches Feld schwebend zu halten, ist in Fig. 14 abgebildet. Der Magnet M stellt dadurch, daß er seinen Anker anzieht, durch das Ventil V Verbin-

dung mit einer Injektorpumpe her und bewirkt dabei nach dem Verfahren von C. T. R. Wilson (Fig. 12) vermittelst der Probierröhre T eine Expansion, die nachträglich durch das Manometer H gemessen werden kann.

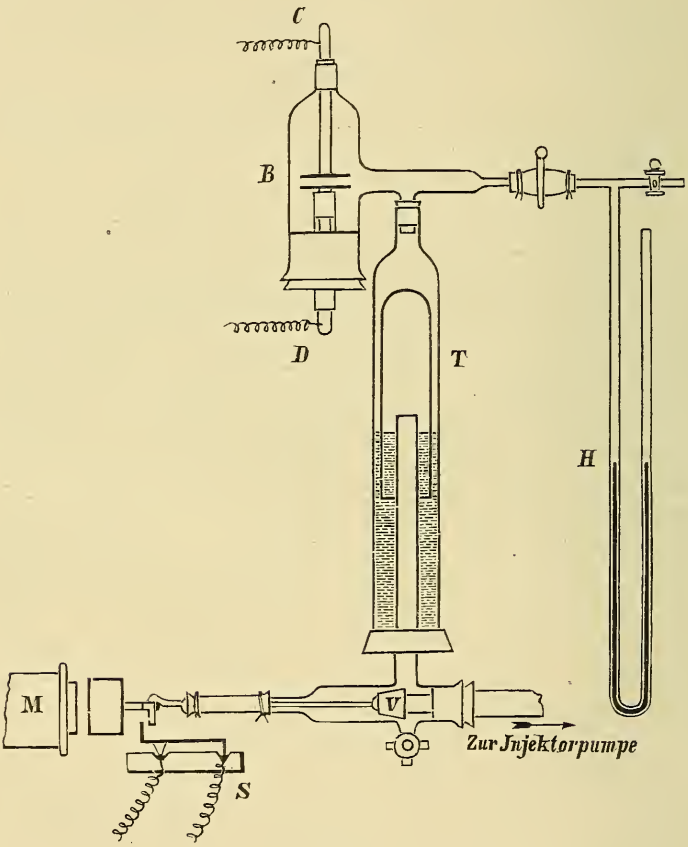


Fig. 14.

In der Glasglocke B wird eine Wolke erzeugt und dann wird zwischen den Platten, die mit den Zuleitungsdrähten C und D verbunden sind, das elektrische Feld hergestellt. Die Drähte sind mit einer Batterie von vielen Elementen verbunden. Das

Feld wird erst nach Bildung der Wolke hergestellt, weil sonst alle Ionen aus dem Gefäß durch elektrolytische Wirkung entfernt werden würden. Zur Erzeugung der Ionen dienten Röntgenstrahlen, aber der Induktionsapparat, welcher die Strahlen erregte, wurde in dem Augenblick, als das Ventil von dem Magnet geöffnet wurde, durch die Vorrichtung S automatisch ausgeschaltet.

J. J. Thomson hat neuerdings seine Versuche wiederholt und aus ihnen, zusammen mit einer Bestimmung von N *eu* vermittelst einer unabhängigen Geschwindigkeitsmessung, für *e* den Wert von $3{,}4 \times 10^{-10}$ elektrostatischen Einheiten gefunden, welcher jetzt als der zuverlässigste gilt.

Daß H. A. Wilson nach einer ganz anderen Methode den Wert $3{,}1 \times 10^{-10}$ gefunden hat, wurde bereits erwähnt.

Daß diese Messungen genau ausgeführt werden, ist deshalb von Wichtigkeit, weil sie es ermöglichen, *m*, die Masse eines Elektrons oder eines Atoms Materie genau zu bestimmen.

Eine der ersten direkten Bestimmuugen der mittleren Ladung eines Gasions wurde von Professor Townsend ausgeführt (*Philosophical Magazine*, Februar 1898). Seine Methode bestand darin, daß er frisch entwickeltes Gas durch Wasser perlen ließ und die Ladung der einzelnen Gasbläschen maß. Dabei wurde hypothetisch angenommen, daß jedes Bläschen nur ein Ion enthält. Dies scheint aber wirklich der Fall zu sein, da sich für die Ladung der Wert 3×10^{-10} elektrostatische Einheiten ergab.

Eine andere von Professor J. J. Thomson benutzte und im *Philosophical Magazine* für März 1903 beschriebene Methode diente zur Bestimmung des Maximalstromes zwischen Elektroden in ionisierter Luft.

Es ist vielleicht nicht überflüssig, wenn wir folgende erläuternde Bemerkung von G. Owen hier anführen:

Thomsons Schlußfolgerungen.

„Was Professor Thomson auszuführen gelang, war die Messung der Ladung des negativen Ions, welches in Luft durch Röntgenstrahlen erzeugt wird. Es bietet sich nun naturgemäß die Frage: Welche Gründe hatte Professor Thomson, aus einer Bestimmung der Ladung eines in Luft unter besonderen Umständen entstehen-

den Ions einen allgemeinen Schluß über die Masse eines Elektrons zu ziehen?

„Die Antwort ist die folgende: Es war bekannt, daß die in einem Gas erzeugten negativen Ionen die gleichen Eigenschaften hatten, *einerlei in welcher Weise sie entstanden waren.* So bewegen sich z. B. die durch X-Strahlen, durch Radiumstrahlen und durch ultraviolettes Licht erzeugten negativen Ionen unter dem Einfluß einer gegebenen elektrischen Kraft mit derselben Geschwindigkeit; ferner zeigen sie ein übereinstimmendes Verhalten in bezug auf ihr Vermögen, als Kondensationskerne für übersättigten Wasserdampf zu wirken. Daher war zunächst die Annahme gerechtfertigt, daß die Ladung eines durch X-Strahlen erzeugten Ions gleich der Ladung eines Ions ist, welches durch das Auffallen von ultraviolettem Licht auf eine Metalloberfläche erzeugt wird. (Die Richtigkeit dieses Schlusses wurde später von Prof. Thomson experimentell nachgewiesen.) Ferner war das Verhältnis e/m für die Kathodenstrahlenteilchen, für die Träger negativer Elektrizität von glühenden Fäden und von *Metallplatten, die durch ultraviolettes Licht beleuchtet* wurden, bei niedrigen Drucken bestimmt worden, und man wird sich erinnern, daß in allen diesen Fällen derselbe Wert von e/m erhalten wurde; dies rechtfertigte aber die Vermutung, daß die Ladung eines *Elektrons* dieselbe war wie die eines durch ultraviolettes Licht erzeugten Ions, und also dieselbe wie eines durch X-Strahlen erzeugten negativen Ions."

Schätzung der Größe.

Auf Grund der Hypothese, daß das fliegende oder vibrierende Fragment eine mit Elektrizität geladene materielle Korpuskel ist, so daß es eine doppelte Konstitution und eine aus zwei Arten, einer materiellen und einer elektrischen, zusammengesetzte Trägheit hat, ist ein weiterer Fortschritt nicht möglich. Aber auf Grund der Hypothese, daß das fliegende oder vibrierende Teilchen ein Elektron ist — eine Ladung Elektrizität und weiter nichts — ein Bestandteil eines Atoms aber ohne materiellen Kern —, so daß alle Eigenschaften des Atoms möglicherweise von einem Aggregat von Elektronen von entgegengesetztem Vor-

zeichen herrühren, von denen eins oder zwei verhältnismäßig frei und abtrennbar sind — auf Grund dieser Hypothese ergibt sich aus der Bestimmung der Masse einer Korpuskel als Konsequenz auch die Bestimmung der Größe derselben.

Einem Draht kann nämlich, wie bereits gesagt wurde, jeder beliebige Grad von Selbstinduktion erteilt werden, indem man ihn fein genug macht, und einer elektrischen Ladung kann jeder beliebige Grad von Energie gegeben werden, indem man sie konzentriert genug macht. Daher ist die Energie bei einer gegebenen Geschwindigkeit sowohl der Quantität als dem Potential proportial, und das letztere können wir so groß machen wie wir wollen, indem wir den Körper, welcher die Ladung besitzt, sehr klein machen.

Die intensive Kraftregion dicht an dem Draht oder dicht an der geladenen Partikel ist die wirksame Region; und wenn wir die Masse oder die kinetische Energie bei einer gegebenen Geschwindigkeit kennen, so können wir auch bei einer rein elektrischen Theorie der Materie die Größe der Elektronen bestimmen, aus denen sie der Hypothese gemäß zusammengesetzt ist. Denn einerlei, ob es eine wesentlich materielle Trägheit gibt oder nicht, jedenfalls gibt es eine elektrische Trägheit. Die Ursache der letzteren ist bekannt; sie rührt von der Reaktion der elektrischen und magnetischen Felder während der Beschleunigungsperioden her und wird als Selbstinduktion bezeichnet.

Es ist sehr leicht möglich, daß es keine andere Trägheit gibt. Vielleicht ist das, was wir als Trägheit der gewöhnlichen Materie betrachten, einfach die elektrische Trägheit oder die Selbstinduktion einer ungeheueren Anzahl von Ionenladungen oder elektrischen Atomen oder Elektronen.

Dies ist bei weitem die interessanteste Hypothese, da sie uns weiter fortzuschreiten gestattet und genau definiert ist. Eine Beimischung von Eigenschaften, die zum Teil erklärt sind, nämlich die elektrischen, und zum Teil nicht erklärt, nämlich die materiellen, führt zu keinem Ziel, solange wir kein Mittel haben zu beurteilen, vieviel vom Ganzen dem einen oder dem anderen Bestandteil angehört.

Die Masse einer Korpuskel ist, wie durch Messung festgestellt worden ist, ungefähr gleich $\frac{1}{1000}$ der Masse eines Wasser-

stoffatoms, und die Ladung gleich 10^{-10} elektrostatischen Einheiten. Diese Elektrizitätsmenge würde aber diesen Betrag von Trägheit nur dann besitzen, wenn sie sich auf einer Kugel vom Radius 10^{-13} Zentimeter befände. Folglich können wir annehmen, daß der Durchmesser des reinen Elektrons von der Ordnung 10^{-13} Zentimeter oder gleich $\frac{1}{100\,000}$ der linearen Dimension ist, die als Molekulargröße bezeichnet wird, nämlich 10^{-8} Zentimeter.

Die Berechnung der Größenordnung ist für alle gewöhnlichen Geschwindigkeiten sehr einfach; für diese ist

$$m = \mu e^2/a,$$

also

$$a = \frac{e}{m} \cdot \mu e = 10^7 \times 10^{-20} = 10^{-13} \text{ cm};$$

für einige Daten ergibt sich allerdings ein kleinerer Wert, nämlich 10^{-14}.[1]) Durch eine so geringe Größe wie diese erklärt sich leicht das Durchdringungsvermögen der Kathodenstrahlen, namentlich wenn die materiellen Atome selbst aus solchen winzigen Teilchen zusammengesetzt sind. Denn die Zwischenräume sind ungeheuer groß im Vergleich mit dem ausgefüllten Raum, und ein Punkt kann leicht in ein solches Aggregat eindringen, ohne mit etwas zusammenzustoßen.

Durchdringlichkeit der Materie für Elektronen.

Die mittlere freie Weglänge eines Teilchens ist eine Frage der Wahrscheinlichkeit. In einem Raum, welcher in der Volumeinheit n_1 Hindernisse enthält, enthält ein Raum Ax deren $n = Axn_1$; und die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstoßes, während eines von ihnen die Strecke x zurücklegt, ist annähernd ihre Gesamtfläche als Zielscheibe im Vergleich der gesamten für Treffen oder Nichttreffen zur Verfügung stehenden Fläche, d. h.

$$\frac{n\pi a^2}{A}; \text{ wofür man } \beta x \text{ oder } \frac{x}{\bar{x}}$$

schreiben kann, wenn $\bar{x}$ die „mittlere freie Weglänge“ oder der mittlere Weg ist, den ein Teilchen zurücklegt, ohne mit einem anderen

1) Siehe Lodge im *Electrician* vom 12. März 1857, **38**, 644, wo die Größe aus dem damals soeben entdeckten Zeeman-Effekt abgeleitet ist.

zusammenzustoßen, und β die Anzahl der Zusammenstöße während der Zeit, in welcher die Einheit der Entfernung zurückgelegt wird. Dabei nehmen wir keine Rücksicht auf die Kräfte zwischen den Teilchen, auch nicht auf ihre Bewegung; auch rechnen wir die Bewegung eines Teilchens um ein anderes herum nicht als Zusammenstoß.

Trotzdem ist, was die Größenordnung betrifft,

$$\bar{x} = \frac{A\,x}{n\pi a^2} = \frac{1}{n_1 \pi a^2} = \frac{d^3}{\pi a^2},$$

wenn d^3 der jedem Teilchen zukommende Raum und $\frac{4}{3}\pi a^3$ die wirkliche Größe desselben ist.

Es ist daher annähernd

$$\frac{\bar{x}}{a} = \frac{\text{Gesamtraum, den die Teilchen einnehmen}}{\text{Einigemal das Gesamtvolum der Teilchen}},$$

ein Satz, welcher dem Satz von Clausius oder Loschmidt in der kinetischen Gastheorie einigermaßen analog ist.

Die mittlere Weglänge kann aber geschätzt werden, indem man sich vergegenwärtigt, wieviel Raum die Substanz sämtlicher Elektronen in einem Atom einnimmt im Vergleich mit dem gesamten Raum, den das Atom selbst einnimmt. Mit anderen Worten, wir müssen uns eine Vorstellung davon machen, was die Größe 10^{-13} für den Durchmesser eines Elektrons bedeutet im Vergleich mit der Größe 10^{-8} für den Durchmesser eines Atoms. Im Sonnensystem ist der Durchmesser der Erde $\frac{1}{24000}$ vom Durchmesser ihrer Bahn um die Sonne. Wenn aber die Erde ein Elektron repräsentiert, so würde ein Atom eine Kugel einnehmen, welche die Sonne zum Mittelpunkt und das Vierfache der Entfernung der Erde als Radius hätte.

Mit anderen Worten, wenn ein Atom mittlerer Größe aus Elektronen zusammengesetzt ist, so sind sie in diesem Atom im Verhältnis zu ihrer Größe so weit voneinander entfernt wie im Sonnensystem die Planeten im Vergleich zu ihrer Größe voneinander entfernt sind.

In einem Wasserstoffatom würden also ungefähr 1000 oder genauer 700 Elektronen sein müssen, um die Masse des Atoms zu bilden.

In einem Natriumatom, welches dreiundzwanzigmal so schwer ist, müßten ungefähr 15 000 Elekronen sein.

Und in einem Quecksilberatom müßten über 100 000 Elektronen sein, wenn die Masse des Atoms ganz von ihnen herrührt.

Man denke sich nun ein Quecksilberatom, welches 100 000 dieser Körper in einer Kugel von 10^{-8} Zentimeter Radius zusammengepackt enthält. Man könnte denken, sie müßten ungeheuer dicht zusammengedrängt sein; es ist jedoch reichlich Raum vorhanden. Jedes Elektron hat einen Durchmesser von nur 10^{-13} Zentimeter, und auf jedem Durchmesser des Atoms befinden sich nur fünfzig von ihnen, während hunderttausend auf derselben Strecke Platz haben würden; der leere Raum innerhalb des Atoms ist also ungeheuer viel größer als der von den Elektronen ausgefüllte Raum, mindestens tausendmal größer in linearer Dimension oder tausendmillionenmal größer im Volum.

Das Gesamtvolum des Atoms ist 10^{-24} ccm; das Gesamtvolum sämtlicher Elektronen, die das Atom bilden, ist $10^5 \times 10^{-39} = 10^{-34}$ ccm; folglich ist der leere Raum 10^{10} oder tausendmillionenmal größer als der ausgefüllte Raum.

Selbst in einem Quecksilberatom sind daher die Elektronen nicht dichter zusammengedrängt als die Planeten im Sonnensystem. Denn wenn auch die äußeren Planeten weiter voneinander entfernt sind als die inneren, so sind sie auch im entsprechenden Verhältnis dicker.

Wenn wir also zu dem oben, wenn auch nicht sehr streng bewiesenen Satz, der in der kinetischen Gastheorie zuweilen der Satz von Loschmidt genannt wird, zurückkehren, so erhalten wir:

$$\frac{\text{Mittlere freie Weglänge}}{\frac{1}{8}\text{ Durchmesser des Teilchens}} = \frac{\text{Volum des den Teilchen zur Verfügung stehenden Raumes}}{\text{Gesamtvolum der Substanz sämtlicher Teilchen.}}$$

Berechnet man den letzteren Bruch für ein Atom Quecksilber, so ergibt sich

$$\frac{\frac{4}{3}\pi \times (10^{-8})^3}{100\,000 \times \frac{4}{3}\pi\,(10^{-13})^3} = \frac{10^{-24}}{10^5 \times 10^{-39}} = 10^{10}.$$

Die mittlere freie Weglänge eines *Elektrons* in einem Quecksilberatom ist also vergleichbar dem 10^9-fachen der Größe eines Elektrons, d. h. sie ist gleich 10^{-4} Zentimeter; es kann daher die Substanz von ungefähr 10000 Quecksilberatomen, die in gerader Linie liegen, durchdringen, ohne mit etwas zusammenzustoßen.

In einer weniger dichten Substanz kommt es noch weiter. In gewöhnlicher Luft würde es einen Weg von ungefähr vier Zoll zurücklegen können, ohne daß ein Zusammenstoß eintritt. Wenn Korpuskeln in ein dichtes Metall eindringen, so ist der in diesem zurückgelegte Weg sehr klein, durchschnittlich nur der tausendste Teil eines Millimeters, und er braucht durchaus nicht eine gerade Linie zu sein; ein Platinschirm hält sie in unmittelbarer Nähe der Oberfläche zurück und läßt die durch den Stoß erzeugten X-Strahlen ungehindert ausstrahlen. Manche Korpuskeln werden noch plötzlicher angehalten als diese, und einige dringen weiter ein, aber 10^{-4} Zentimeter oder ein Tausendstel Millimeter kann als die mittlere Entfernung angesehen werden, welche in einem festen Körper von der Dichte des Platins zurückgelegt wird.

Wirkungen eines Zusammentreffens.

Diese Entfernung gibt jedoch keine Vorstellung von dem Wert der negativen Beschleunigung während des Zusammenstoßes, da der größte Teil jenes Tausendstel Millimeters freier Flug ist; das Anhalten findet nur in der letzten Episode dieses Fluges, nämlich in dem Augenblick des Zusammenstoßes statt. Die zusammenstoßenden Massen verhalten sich wie 100000 zu 1, so daß die Änderung der Geschwindigkeit geschätzt werden kann; allein der Zusammenstoß hat in Wirklichkeit mehr einen astronomischen oder kometarischen Charakter, und die Wirkung ist eine ähnliche wie bei Kometen, die in die Nähe eines Planeten kommen und zu permanenten Gliedern des Sonnensystems werden.

Das *gewöhnliche* Verhalten eines fremden Kometen, welcher kommt und geht, kann ein Zusammenstoß mit der Sonne und Zurückprallen von derselben genannt werden; denn wenn auch kein eigentliches Zusammentreffen der Hauptmasse stattfindet, so würde der Vorgang doch den Eindruck eines solchen machen,

wenn er aus den Tiefen des Raumes gesehen werden könnte; die beiden Zweige der hyperbolischen Bahn des Kometen würden wie zwei in der Sonne zusammentreffende gerade Linien aussehen.

Kometen dagegen, welche einem Planeten sehr nahe kommen, werden abgelenkt, herumgewirbelt und oft von dem Planeten angehalten, so daß sie sich nur mit einer unbedeutenden Differentialgeschwindigkeit entfernen, die nicht hinreicht, sie der Anziehung der Sonne zu entziehen, nach der sie sich dann hinbewegen. Wenn sie nicht wirklich in die Sonne fallen, so bewegen sie sich in einer elliptischen Bahn um dieselbe, werden Glieder des Sonnensystems und gehen unter Umständen schließlich in einen Meteorschwarm über.

Derartige Vorgänge kommen, wie wir wissen, in der Astronomie vor; und etwas ähnliches kann stattfinden, wenn ein mit ungeheurer Geschwindigkeit fliegendes kometenartiges Elektron mit einem Teil des Massensystems eines Atoms zusammentrifft.

Die Hemmung findet demnach innerhalb der Grenzen der Atomgröße, 10^{-8} Zentimeter, statt; also ist die Beschleunigung von der Ordnung $\frac{u^2}{2b} = 10^{26}$ C. G. S., und die Kraft, welche erforderlich ist, um nur ein einziges Elektron anzuhalten, ist ein Zehntel Dyn.

Es ist nicht zu verwundern, daß heftige Strahlungseffekte erzeugt werden. Die „Kraft", welche erforderlich ist, um ein Elektron anzuhalten, welches sich mit der Lichtgeschwindigkeit innerhalb der Dimensionen eines Moleküls bewegt, kann in folgender Weise geschätzt werden:

$$\text{Energie: Zeit} = \frac{1}{2} m u^2 \cdot \frac{u}{2b}$$

$$= 10^{-27} \, (10^9)^3 \, 10^8 = 10^8 \text{ Erg pro Sekunde,}$$

oder in folgender Weise:

$$F l : t = \frac{1}{2} F u = 10^{-1} \times 10^{9\frac{1}{2}} = 10^8,$$

was gleich 10 Watt ist. (Die Zeit, welche die Kraft wirkt, ist nur der 10^{-17} Teil einer Sekunde.)

Aber nur ein kleiner Bruchteil hiervon geht in Strahlung über. Die Strahlungsenergie kann nach dem in Anhang G ab-

geleiteten Ausdruck von Larmor in folgender Weise geschätzt werden:

$$\frac{\mu e^2}{v}(\dot{u})^2 = \frac{10^{-40}}{10^{10}} \times 10^{52} = 1000 \text{ Erg pro Sekunde.}$$

Der Rest muß also die Form von Wärme annehmen.

Da bei den Aufprallen der Teilchen zuweilen Wärme erzeugt und zuweilen X-Strahlen ausgesandt werden, so ist es von Interesse zu untersuchen, von welchen Umständen es abhängt, ob mehr die eine oder die andere Wirkung hervorgebracht wird. Es sei u die Geschwindigkeit und l die Strecke, auf welcher die Hemmung stattfindet. Dann ist

$$\dot{u} = \frac{u^2}{2\,l};$$

also ist die zur Hemmung erforderliche Kraft

$$m\dot{u} = \frac{2\,\mu e^2}{3\,a} \cdot \frac{u^2}{2\,l}.$$

Die Energie des Schlages ist

$$\frac{1}{2} F u = \frac{\mu e^2 u^3}{6\,a\,l},$$

während die Strahlungsenergie

$$\frac{2\,\mu e^2}{3\,v} \cdot \left(\frac{u^2}{2\,l}\right)^2 = \frac{\mu e^2 u^4}{6\,v\,l^2}$$

ist; folglich ist $\frac{\text{Strahlungsenergie}}{\text{Gesamtenergie}} = \frac{a}{l} \cdot \frac{u}{v} = \frac{2\,a}{v\,t}$, wenn t die Dauer der Hemmung und v die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die wirksame Strahlungsenergie beruht also hauptsächlich darauf, daß die Hemmung sehr plötzlich stattfindet und daß die Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nahekommt. Wenn die Geschwindigkeit gleich dem zehnten Teil der Lichtgeschwindigkeit ist und das Elektron auf einer Strecke, die ungefähr gleich seinem Durchmesser ist, angehalten wird, so gehen ungefähr 10 Prozent der Energie in Strahlung über, während der Rest andere Formen, vermutlich die Form von Wärme annimmt. Um eine solche Hemmung zu bewirken, würde aber eine ungeheure

„Kraft" erforderlich sein, nicht weniger als zwei bis dreitausend Kilowatt für jedes Elektron. Also ist eine Hemmung innerhalb atomistischer Dimensionen alles was erwartet werden kann und was durch etwa 50 Watt bewirkt werden kann. In diesem Falle würde aber nur ein außerordentlich geringer Bruchteil des Ganzen — nur ungefähr ein Millionteil — die Form von X-Strahlen annehmen; ihre Wellenschale würde dann eine mit der Größe eines Moleküls vergleichbare Dicke haben; während sie im vorhergehenden Falle unvergleichlich dünner und daher viel durchdringender war. Beide Dicken sind aber sehr klein im Vergleich mit den Wellenlängen gewöhnlichen Lichtes.

Wenn die Geschwindigkeit kleiner wird, so nimmt ein immer größerer Teil der Energie die Form von Wärme an; dies steht mit der Tatsache in Einklang, daß in einem mäßigen Vakuum durch die Elektronen Rotglut erzeugt wird.

Die Strahlungsenergie verhält sich zur Gesamtenergie wie die Dimensionen eines Elektrons zu der Strecke, welche das Licht während der Dauer der Hemmung zurücklegen würde, wenn die Beschleunigung gleichförmig wäre. Wenn also *sämtliche* Energie die Form von Strahlungsenergie annehmen soll, so muß ein Kügelchen angehalten werden, welches mit dem zehnten Teil der Lichtgeschwindigkeit eine Strecke zurücklegt, die ungefähr gleich dem zehnten Teil seines eignen Durchmessers ist.

10. Kapitel.

Die Elektronentheorie der Leitung und Strahlung.

Inzwischen hatte die Wahrscheinlichkeit der Existenz der Elektronen und die Möglichkeit, alle elektrischen und die meisten anderen Erscheinungen der Materie durch sie zu erklären, eine neue Stütze durch die Spekulationen einiger mathematischer Physiker gefunden, unter denen in erster Linie Professor H. A. Lorentz und Dr. J. Larmor zu nennen sind. Der erstere wurde durch das Problem der astronomischen Aberration des Lichtes und der Optik bewegter Medien, die er von elektrischem Standpunkt aus bearbeitete, auf das Gebiet der Elektronentheorie gelenkt. Der letztere kam zu demselben Ziel von einem anderen Gebiete her, nämlich von der Dynamik des freien Äthers; diese erforderte im Sinne der von Mac Cullagh und Kelvin begründeten Theorie diskrete bewegliche Störungsquellen (Elektronen) als Grundlage der Entwicklung. Beide versuchten alle elektrischen Eigenschaften auf das Verhalten der Elektronen zurückzuführen; diese waren allerdings gewöhnlich mit materiellen Atomen verbunden. Larmor machte auch den Versuch, durch gedachte „Modelle" die dynamische Möglichkeit einer Struktur im Äther zu veranschaulichen, welche die Eigenschaften eines positiven oder negativen Elektrons — das eine war das Spiegelbild des andern — und so einen großen Teil der Physik möglichst zu vereinfachen. Dieser schöne Versuch, welcher im Jahre 1894 ausgeführt wurde, umfaßte bestimmte Vorstellungen über die Struktur eines Elektrons, über seine Größe, unter der Annahme, daß die Trägheit ausschließlich elektrischer Natur ist, über die Geschwindigkeiten, mit denen sich die Elektronen im Molekül bewegen, und über-

haupt eine Elektronentheorie der Materie. Man hatte aber damals keine Kenntnis von der Masse eines Elektrons und nahm an, daß sie der Masse eines Wasserstoffatoms vergleichbar sei. Eine große Menge höchst lehrreichen Materials findet man in Dr. Larmors Beiträgen zu den Transactions of the Royal Society für 1894, 5, 7; der Inhalt einiger dieser Abhandlungen findet sich gekürzt in dem Buch „Ether and Matter" (Verlag der Cambridge University Press, 1900).

Hier mag nur bemerkt werden, daß das Elektron die Grundlage der ganzen Behandlung bildet und daß angenommen wird, daß jeder elektrische Strom durch die Bewegung von Elektronen erzeugt wird. Sie können sich mit den Atomen bewegen wie bei der Elektrolyse in Flüssigkeiten; sie können für sich allein fliegen, wie in verdünnten Gasen; oder sie können von einem Atom zum nächsten weitergereicht werden, wie bei dem Vorgang der Leitung in festen Körpern.

Leitung.

Es gibt drei verschiedene Arten der Leitung oder Übertragung der Elektrizität, die ich beziehungsweise die Vogelsamenmethode, die Büchsenkugelmethode und die Feuereimermethode nennen will.

Die Vogelsamenmethode kommt in Flüssigkeiten und in der Regel in Gasen von gewöhnlicher Dichte in Anwendung; ein Beispiel bildet die Elektrolyse. Der Vogel nimmt den Samen mit und läßt ihn nur dann fallen, wenn er eine Elektrode erreicht.

Die Büchsenkugelmethode ist die Methode in verdünnten Gasen, namentlich bei den Kathodenstrahlen. Der Raum an der Kathode repräsentiert die Länge des Gewehrlaufes und der Rest des Weges entspricht der Bahn, welche die Kugel beschreibt. Wenn das Projektil ein Atom trifft, so kann der Stoß bewirken, daß von diesem Atom ein anderes Projektil hinwegfliegt und so die Konvektion übernimmt.

Die Feuereimermethode muß die Methode der Leitung in festen Körpern sein, wo die Atome keiner Ortsveränderung fähig sind und die Elektronen nur von Hand zu Hand weitergeben können; dabei schwingen die Atome ein wenig in einer Richtung,

um die Elektronen aufzunehmen, und in einer anderen Richtung, um sie abzugeben, und kommen so nach und nach in einen Schwingungszustand, den wir Wärme nennen. Eine derartige Bewegung wird aber für die Beförderung der Elektronen immer mehr entbehrlich, je weniger der Körper der unregelmäßigen Bewegung der Moleküle ausgesetzt ist, die wir Wärme nennen. Es mag die Ausdehnung und die Vergrößerung der Entfernung der Moleküle oder die unregelmäßige Bewegung derselben sein, was die Leitungsfähigkeit vermindert, jedenfalls wird die Leitung mit fallender Temperatur vollkommener und bei sehr niedrigen Temperaturen findet die Übertragung der Elektrizität sehr leicht statt. Die Leitung in heterogenen Legierungen ist weniger einfach und es ist dabei wahrscheinlich eine entgegengesetzte elektromotorische Kraft im Spiel, die an unzähligen Berührungsstellen entwickelt wird; andernfalls würde es von Interesse sein, den Einfluß einer niedrigen Temperatur auf die Leitungsfähigkeit eines Metalls zu untersuchen, welches sich in der Kälte nicht zusammenzieht.

Die Extraleitungsfähigkeit warmer Elektrolyten ist eine ganz andere Erscheinung; sie ist keine eigentliche Leitung, sondern konvektive Bewegung der Ionen. Derselbe Temperatureinfluß, welcher die innere Reibung der Elektrolyten vermindert, erhöht ihre Leitungsfähigkeit.

Isolatoren sind Körper, in denen die Leitung nur mit Heftigkeit vor sich gehen kann. Metalle sind Körper, in denen ein Elektron mit Leichtigkeit von einem Atom zum anderen übergeht, und es ist keine Kraft erforderlich, solange der Prozeß nicht übermäßig gesteigert wird; es ist dann ein Prozeß von der Natur einer *Diffusion*. Ein ähnlicher Zusammenhang kann zwischen den Molekülen existieren, die eine Kette bilden, in welcher sich eine Schwingung fortpflanzt; daher kann die Elektrizitätsleitung viel Ähnlichkeit mit der Wärmeleitung haben, obgleich es zwei ganz verschiedene Vorgänge sind.

Eine Theorie der Leitung in Metallen ist von Riecke, Drude, Thomson, Lorentz und vielen anderen ausgearbeitet worden; es wird dabei angenommen, daß die Elektronen zeitweise so lange frei bleiben, daß ihre mittlere kinetische Energie, wie in der Gastheorie, eine Funktion der Temperatur ist.

Am meisten wissen wir über die Leitung in Elektrolyten und Gasen. In Gasen bewegen sich die negativen Elektronen, wenn sie frei sind, am schnellsten, während sich die Ionen in den meisten Fällen und die positiven Ladungen immer langsamer bewegen, weil sie mit Materie verbunden sind.

Bei der Leitung in Flüssigkeiten sind immer Ladungen von jedem Vorzeichen mit Atomen verbunden, und sie bewegen sich nur als Ionen mit geringer Diffusionsgeschwindigkeit, die von Kohlrausch berechnet und von mir[1]), Whetham und anderen direkt beobachtet wurde.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Ladungen in festen Körpern bewegen, kann nicht direkt ermittelt werden, aber das Hallsche Phänomen (siehe Larmor, *Phil. Trans.*, Aug. 1894, 815) scheint darauf hinzudeuten, daß in einer Klasse von festen Körpern die positiven, in einer anderen dagegen die negativen sich am schnellsten bewegen, was bekanntlich in Flüssigkeiten der Fall ist. In Säuren z. B. wandern die positiven Ladungen am schnellsten, weil sie mit leichten und vermutlich kleinen Wasserstoffatomen verbunden sind; und die unverhältnismäßig große Beweglichkeit der leichten und kleinen Wasserstoffatome ist die Ursache, daß Säuren im allgemeinen so gute Leiter sind.

Die Hallsche magnetische Ablenkung ist ebenso wie die Faradaysche Drehung ein Differentialeffekt und würde gleich Null sein, wenn positive und negative Ladungen gleich stark beeinflußt würden. Auch in Gasen ist ein Differentialeffekt, aber hier sind die negativen Ladungen so frei im Vergleich mit den positiven und so überwiegend, daß der Halleffekt in Gasen, namentlich in verdünnten Gasen sehr groß ist im Vergleich mit den Resteffekten in Flüssigkeiten und festen Körpern. Infolgedessen ist die ablenkende Wirkung eines Magnets auf die Bahn der Kathodenstrahlen in einer Crookesschen Röhre so leicht zu demonstrieren.

Strahlung.

Es ist aber nicht nur die fortschreitende Bewegung der elektrischen Anhänge des Atoms, die wir zu betrachten haben;

1) Lodge, *British Association Report,* Birmingham Meeting, 1886, 389—413.

wir müssen auch annehmen, daß sie im Atom selbst Bewegungen ausführen können, entweder Schwingungen wie der Knopf eines Kaleidophons oder Bewegungen in einer geschlossenen Bahn wie ein Trabant des Atoms. Das Strahlungsvermögen eines Atoms ist jedenfalls auf die abgestimmten Schwingungen oder Umläufe des Elektronensystems in dem Atom oder um das Atom herum zurückzuführen. Die Materie allein hat keinen wahrnehmbaren Zusammenhang mit dem Äther, wie ich in meiner Abhandlung in den *Philosophical Transactions* für 1893 und 1897 [1]) nachgewiesen habe; jeder Zusammenhang wird durch elektrische Ladung hergestellt, und selbst dann ist es kein *reibungsartiger* Zusammenhang; es ist kein Zusammenhang, der auf Einflüsse zurückzuführen ist, die der Geschwindigkeit entgegenwirken, so daß er den Charakter einer Reibung haben würde [2]), es ist nur ein beschleunigend wirkender Zusammenhang; nur wenn die Ladung schwingt und während sie sich im Zustand der Beschleunigung befindet, ist sie imstande den Äther aus der Entfernung durch Aussendung von Wellen zu beeinflussen. [3]) Diese Wellen bestehen wahrscheinlich aus periodischen Spannungsänderungen, ohne daß der Äther im ganzen in Bewegung ist, aus einer zitternden Bewegung seiner gleichen entgegengesetzten Bestandteile über eine äußerst kleine Amplitude, eine Art von Bewegung, welche das, was wir Strahlung nennen, bildet. Es sind nicht die Schwingungen, die das Atom als Ganzes ausführt, die den Äther erregen, sondern die Schwingungen oder das Anfangen und das Aufhören der Schwingungen seiner elektrischen Ladung. *Beschleunigung der elektrischen Ladung* ist die einzige bekannte Ursache einer Gleichgewichtsstörung im Äther. Aber normale oder zentripetale Beschleunigung, die weiter nichts als Änderung der Richtung zur Folge hat, ist ebenso wirksam als wirkliche Änderung der Geschwindigkeit. Wenn eine elektrische Ladung imstande ist eine kleine Bahn vierhundertbillionenmal in der Sekunde zu beschreiben, so sendet sie die niedrigste Art sichtbaren roten Lichtes aus. Diese Anzahl von Umläufen ist gleich der Anzahl der Sekunden von ungefähr vierzehn Millionen Jahren oder der Zeit, die seit

1) Lodge, *Phil. Trans.* 184, 727—804 und 189, 149—166.
2) Siehe namentlich *Phil. Trans.* 189. 164.
3) Siehe 1. und 9. Kap. sowie Anhang G.

einer früheren geologischen Periode verflossen ist. Wenn sie sich schneller bewegt, so sendet sie Licht von höherer Brechbarkeit aus; und die besondere Art der Strahlung, die von dem Atom einer Substanz ausgesandt wird, wenn es sich in einem einigermaßen freien Zustand befindet, hängt von der Umlaufszeit seiner Elektronen ab, wenn sie als selbständig angesehen werden könnten. Aber wenn dies der Fall wäre, so würde jedes Atom alsbald durch Strahlung sich selbst vernichten. Die Bedingung, welche ein Atom erfüllen muß, um seine Energie zu erhalten, wurde von Larmor (*Phil. Mag.* Dez. 1897) in der Form gegeben, daß die Vektorsumme der Beschleunigungen aller seiner Elektronen, mit Berücksichtigung der Vorzeichen, immer gleich Null sein muß. Diese Bedingung steht mit den andern, von der Dynamik geforderten Bedingungen vollkommen in Einklang.

Jede Rotationsgeschwindigkeit entspricht einer bestimmten Linie im Spektrum. Wenn dies aber die wirkliche Ursache derselben ist, so muß die Strahlung durch Magnetismus beeinflußt werden, denn eine elektrische Ladung, welche eine geschlossene Bahn beschreibt, bildet einen Kreisstrom; und wenn ein magnetisches Feld erregt wird, dessen Linien diesen Stromkreis durchdringen, so muß es, wenn sich seine Intensität ändert, die Geschwindigkeit entweder vergrößern oder verkleinern, und also die Brechbarkeit entweder erhöhen oder erniedrigen. Wenn Elektronen in allen Richtungen umlaufen und man läßt ein magnetisches Feld auf sie wirken, so muß während des Entstehens des Feldes bei einigen die Geschwindigkeit zunehmen und bei anderen abnehmen, und diese Zunahme oder Abnahme wird nicht eher aufhören, als bis das magnetische Feld wieder zerstört ist.

Wenn aber eine Strahlungsquelle in ein magnetisches Feld gebracht wird und die Linien derselben mit dem Spektroskop untersucht werden, so ist zu erwarten, daß diese Linien in irgend einer Weise beeinflußt, etwa verschoben oder verbreitert werden. Als jedoch Larmor im Jahre 1895 die Größenordnung der zu erwartenden Erscheinung ermittelte, kam er zu der damals berechtigten Annahme, daß ein Elektron hinsichtlich der Größe einem Wasserstoffatom vergleichbar sei. Dann mußte aber der Effekt so klein sein, daß er nicht wahrnehmbar war; bereits Faraday hatte viele Jahre früher, allerdings mit unvollkommenen

Hilfsmitteln einen solchen Effekt zu entdecken versucht, — nicht auf theoretischem Wege, sondern durch eingehende experimentelle Behandlung des Gegenstandes — aber es war ihm nicht gelungen etwas zu beobachten; auch Prof. Tait hatte sich theoretisch mit dem Gegenstand beschäftigt, aber keine neuen Versuche ausgeführt. Auch sonst wurde über den Gegenstand nichts veröffentlicht, bis es schließlich Zeeman in Amsterdam gelang, vermittelst eines starken Magnets und eines guten Gitters einen geringen Effekt zu beobachten, der in der Verbreiterung der Linien einer Natriumflamme bestand, die zwischen den Magnetpolen stand. Dr. Larmor, der im Dezember 1896 eine Notiz hierüber in *Nature* gelesen hatte, schrieb mir, daß dies der Effekt sein müsse, an den er gedacht habe, der aber nach seiner Ansicht zu klein sein müsse, um gesehen werden zu können. Als ich diese Mitteilung erhielt, wiederholte ich sofort den Versuch [1]) und führte ihn in der Sitzung der Royal Society im Mai desselben Jahres vor.

Von diesem einfachen aber wichtigen Ausgangspunkt aus ist das weite Gebiet des Einflusses eines magnetischen Feldes auf die Strahlung verschiedener Substanzen eingehend beobachtet worden, nicht nur vom Entdecker, sondern auch von Preston in Dublin, Michelson in Amerika, Runge und anderen; und so ist eine ganze Reihe wichtiger Tatsachen zutage gefördert worden. Jede Linie ist einzeln studiert worden: einige Linien werden verdreifacht, einige vervierfacht, einige versechsfacht usw. Eine Quecksilberlinie wird in neun oder vielleicht elf Komponenten

1) Siehe *Proc. Roy. Soc.*, 60, 466, 513 und 61, 413, oder *Nature*, 56, 237; auch verschiedene Artikel von Lodge im *Electrician*, 38, (1897). Die Erscheinung wurde von Zeeman unter Mitwirkung von Lorentz theoretisch durch das Bild oder Modell eines umlaufenden Elektrons erläutert, welches zwar nicht ganz zutreffend war, aber als Führer gute Dienste leistete. Dabei wurde die kleine Masse der umlaufenden Partikel abgeleitet und das Ergebnis stimmte gut mit J. J. Thomsons direkten Bestimmungen der Masse eines Elektrons, die einige Monate früher ausgeführt worden waren. Durch verbesserte Methoden wurde eine größere Präzision erreicht, und ein unerwartetes Resultat ergab sich in der Verdreifachung jeder Linie, was von dem Modell wohl angedeutet wurde, aber aus diesem allein nicht vorausgesagt werden konnte. Man fand, daß andere Linien in mehr als drei Komponenten zerfallen, doch ist diese Erscheinung noch nicht vollkommen aufgeklärt.

aufgelöst. Der Effekt ist also nicht zu gering, um gesehen zu werden; allerdings sind kräftige Wirkungen und vorzügliche Instrumente erforderlich, um sie zu erzeugen; und so zeigte es sich klar, daß, wenn Strahlung durch bewegte Elektronen hervorgerufen wird, diese Elektronen nicht mit viel Materie, die sich mit ihnen bewegt, belastet sein können. Es wurde möglich, durch Messung des *Betrages* der Verdoppelung, die die Linien in einem gegebenen Feld erleiden, zu ermitteln, wie viel Materie mit der umlaufenden elektrischen Ladung in jedem gegebenen Fall verbunden war, mit anderen Worten, das in der Strahlung wirksame elektrochemische Äquivalent, d. h. das Verhältnis m/e zu bestimmen. Prof. Zeeman hatte bereits eine derartige Bestimmung gemacht, als er den Effekt in einer geringen Verbreiterung der Natriumlinien bemerkte; und er war zu dem Schluß gekommen, daß das elektrochemische Äquivalent einige tausendmal kleiner war als bei der Elektrolyse. Er fand, daß das Verhältnis e/m auch in diesem Fall den bereits bei den Kathodenstrahlen vermuteten bemerkenswerten Wert von 10^7 C. G. S. hat.

Neuere Messungen haben diese Schätzung bestätigt und gezeigt, daß das Verhältnis der Ladung zur Masse in der Zeemanschen Erscheinung so gut wie identisch ist mit dem Verhältnis der Ladung zur Masse bei den Kathodenstrahlen; mit anderen Worten, das, was auch in den Kathodenstrahlen fliegen mag, eine Strahlungsquelle bildet, und daß, wenn die Kathodenstrahlen aus bewegten Elektronen bestehen, Strahlung durch schwingende oder umlaufende Elektronen hervorgerufen wird. Je mehr die Einzelheiten des Zeemaneffektes studiert werden, desto deutlicher wird es, daß sie durch die Elektronentheorie, die zuerst von Zeeman und H. A. Lorentz, sowie von Fitz Gerald und Larmor in England auf sie angewandt wurde, eine befriedigende Erklärung finden, wenn auch die Theorie noch nicht vollständig ausgearbeitet ist.

Eine der ersten in England veröffentlichten Abhandlungen über das Tatsächliche und die elementare Theorie der Erscheinung bilden zwei Artikel des Verfassers im *Electrician* vom Februar und März 1897 [1]); sie verdienen erwähnt zu werden, weil sie

1) Siehe Lodge, *Electrician* 38, 568 und 643.

zeigen, wie der Gegenstand aufgefaßt wurde, noch ehe man seine volle Bedeutung erkannt hatte. Der hohe Wert von e/m, nämlich $\frac{1}{2} \times 10^7$ C. G. S., oder fünfzig Millionen Coulomb pro Gramm anstatt des mäßigen elektrolytischen Wertes wird auf S. 643 als eine Schwierigkeit erwähnt; und es wird auf eine von Fitz Gerald ausgesprochene Vermutung hingewiesen, die sich als der Anfang einer Elektronentheorie des Zeemaneffektes darstellt. Ferner wird ein äußerst einfaches Verfahren, die Theorie der Bewegung zu geben, vom Verfasser in folgender Weise beschrieben:

Man denke sich den zerlegten Teil einer Bewegung in geschlossener Bahn auf eine Ebene projiziert, die auf dem angewandten magnetischen Feld H senkrecht steht; die Winkelgeschwindigkeit in einem Punkte der Bahn, in welchem der Radius r ist, sei ω; dann wirkt das Feld mit einer radialen Komponente

$$\pm \mu e \mathrm{H} r \omega,$$

die eine Zunahme oder Abnahme der Zentripetalkraft

$$d(m r \omega^2)$$

repräsentiert; hieraus folgt, mit einer ersten Annäherung der Größenordnung, daß

$$d\omega = \pm \frac{\mu e \mathrm{H}}{2 m},$$

und die Änderung der Frequenz, welche die Magnetisierung in den transversalen Komponenten der Strahlung bewirkt, ist daher

$$\pm \frac{\mu e \mathrm{H}}{4 \pi m}.$$

Die andere oder longitudinale Komponente der ursprünglichen Bahn bleibt offenbar unverändert. Dies ist keineswegs eine vollständige und befriedigende Theorie; sie würde es nur für den speziellen Fall sein, daß die Projektion der Bewegung eine Bewegung auf einen Kreis ist; aber es war ein kurzer und einfacher Versuch einer Theorie.

Eine instruktive und interessante Meihode, den Zeemaneffekt zu demonstrieren, wurde von W. König im Jubiläumsband von Wiedemanns *Annalen,* 1897 beschrieben. Eine Emissionsflamme,

die das zu untersuchende Salz enthält, wird in ein starkes magnetisches Feld gestellt, und durch eine Absorptionsflamme, die dasselbe Salz enthält, vermittelst eines doppeltbrechenden Prismas oder ein anderes Doppelbildinstrument betrachtet, so daß man zwei Bilder der Emissionsflamme nebeneinander sieht. Wenn der Magnet erregt wird, wird die Frequenz der Schwingungen der Emissionsflamme senkrecht zu den Kraftlinien verändert und infolgedessen der Betrag der Absorption bedeutend vermindert. Der Erfolg ist der, daß eins von den beiden Bildern jedesmal heller wird, wenn der Magnet erregt wird, während das andere Bild, welches den Schwingungen in der Richtung der Kraftlinien entspricht, unverändert bleibt und zur Vergleichung der Helligkeiten dienen kann.

11. Kapitel.

Weitere Diskussion der Elektronentheorie der Magnetisierung des Lichtes und Bestimmung des Verhältnisses m/e bei der Strahlung.

Unter den älteren Beiträgen zu der Theorie der bewegten Ladungen sind wenige bemerkenswerter als die von Dr. Johnstone Stoney über den Strahlungsprozeß; sie fallen in eine Zeit, als man noch keine Kenntnis von der isolierten Existenz dieser Elektronen hatte, ebensowenig von der Tatsache, daß die Aussendung von Licht von der Bewegung der leuchtenden Substanz herrührt. Dr. Stoney hatte im Jahre 1891 die Elektronen in astronomischer Weise behandelt; er behandelte ein Elekron als einen Satelliten, der sich um einen Planeten bewegt, und er diskutierte die verschiedenen Störungen, denen er unterworfen sein könnte, und den Einfluß dieser Störungen auf das Spektrum des ausgesandten Lichtes.[1])

Eine der einfachsten Arten von Störung, die von Newton vollständig analysiert worden ist, ist das sogenannte Vorrücken und Zurückweichen der Apsiden. Es wurde gezeigt, daß eine solche Bewegung im Spektrum ein Duplet erzeugen muß; denn von den beiden Zirkularschwingungen, in welche die Bewegung zerlegt werden kann, ist die eine beschleunigt und also ihr Licht in Brechbarkeit erhöht, die andere dagegen verzögert und ihr Licht in Brechbarkeit erniedrigt worden.

1) „Über die Ursache der Doppellinien und der äquidistanten Satelliten in den Gasspektren". G. Stohnstone Stoney, Transactions of the Royal Dublin Society, IV, 1888—92, S. 563—608.

Eine andere ähnliche Art von Störung, analog der Präzession der Aequinoktialpunkte der Erdbahn, würde ein Triplet im Spektrum erzeugen. Diese präzessionsartige Bewegung findet in einer Bahn statt, auf der eine schiefe oder ablenkende Kraft wirkt. Die Achse beschreibt, anstatt dieser Kraft direkt nachzugeben, eine Art Kegel. Man kann diese Bewegung bei einem Kreisel beobachten, dessen Achse schief steht. Der Zug der Schwerkraft bewirkt nicht, daß der Kreisel umfällt, sondern daß er eine präzessionsartige Bewegung macht. Dasselbe ist bei einem Reifen oder einem Fahrrad der Fall, wenn sie sich nicht in vertikaler Stellung befinden; anstatt umzufallen, bewegen sie sich in einem Kreis, solange ihre Bewegung anhält; sie fallen erst dann, wenn die Bewegung aufhört oder unter einen bestimmten kritischen Wert sinkt. Wenn daher auf die Bahn eines Elektrons eine schiefe oder ablenkende Kraft wirkte, so würde sie nicht sofort die Bahn in die erstrebte Stellung senkrecht zu einer Kraftlinie bringen, sondern bewirken, daß sie eine präzessionsartige Bewegung macht. Die Bewegung kann aber in drei Komponenten zerlegt werden, die oben erwähnten beschleunigten und verzögerten Kreisbewegungen, die eine Verdoppelung der Linie bewirken würden, und eine dritte Komponente, nämlich diejenige parallel zur Achse, die unverändert bleiben und daher eine Spektrallinie repräsentieren würde, die sich in ihrer ursprünglichen Stellung befindet und in der Mitte zwischen den beiden anderen liegt. Dies alles stand, wie sich später herausstellte, in Einklang mit der Entdeckung Zeemans, die er unter Beihilfe seines Landsmannes, des hervorragenden Physikers H. A. Lorentz machte, dessen Theorie in vieler Hinsicht den experimentellen Resultaten vorauseilte.

Es muß bemerkt werden, daß alles Licht, welches von den oben genannten Schwingungskomponenten ausgesandt wird, von *einer* bestimmten Art ist; es wird durch Schwingungen in *einer* bestimmten Richtung erzeugt und ist daher polarisiert. Die Art der Polarisation muß davon abhängen, von welcher Seite her das Licht gesehen wird. Wenn es senkrecht zu der Präzessionsachse gesehen wird, so müssen alle drei Linien geradlinig polarisiert sein, und zwar die mittlere senkrecht zu den beiden anderen. Wird es dagegen in der Richtung der Präzessionsachse gesehen, so muß keine mittlere Linie vorhanden sein, weil die axiale

Schwingung dann nach oben gerichtet sein würde, in welcher Richtung sie keine optische Wirkung hervorbringt; und die beiden seitlichen Linien würden zirkular polarisiert sein.

Durch Fig. 15 werden die Veränderungen veranschaulicht, welche eine Spektrallinie erleidet, wenn man auf die Strahlungsquelle ein kräftiges Magnetfeld wirken läßt.

I stellt einen besonders einfachen Fall dar. Die Kadmiumlinie A, durch Strahlen gesehen, die in der Richtung der Kraftlinien fortschreiten, löst sich in zwei Linien B und C auf, welche in entgegengesetzten Richtungen zirkular polarisiert sind. Dies

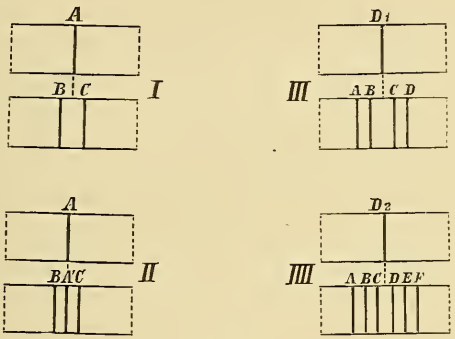


Fig. 15.

rührt daher, daß die eine zirkulare Komponente der geradlinigen oder elliptischen Schwingung beschleunigt und die andere Komponente in demselben Maße verzögert wird.

II stellt dieselbe einfache Linie dar, wie sie durch Licht gesehen wird, welches senkrecht zu den Kraftlinien geht. In diesem Falle wird die Linie dreifach; und wenn A geradlinig polarisiert ist, so sind B und C in einer Ebene polarisiert, die auf der Ebene von A′ senkrecht steht. Dies ist die Folge einer Präzession der Orbitalbewegung, bei der die axiale Schwingung unverändert bleibt, während von den beiden senkrechten die eine beschleunigt und die andere verzögert ist.

III und IIII repräsentieren die Wirkung eines Magnetfeldes auf die gelbe Doppellinie des Natriums. D_1 ist in vier und D_2 in sechs Linien aufgelöst, wenn das Licht durch das Magnetfeld geht.

Zeeman hat direkt nachgewiesen, daß ein Magnetfeld auf eine Lichtquelle einen wahrnehmbaren störenden Einfluß ausübt, Professor Lorentz war sofort imstande die genannten Tatsachen in der Hauptsache vorauszusagen, die Verdreifachung und Verdoppelung der Linien, je nachdem sie in der Richtung der Kraftlinien oder senkrecht zu dieser Richtung gesehen werden, ebenso die genannten Polarisationen, bei denen die magnetischen Kraftlinien die Präzessionsachse bilden. Und alle diese Wirkungen wurden kurz nachher von Zeeman und anderen beobachtet, und sie sind charakteristisch für die einfachste kreisförmige Bahn.

Die volle Bedeutung dieser Erscheinungen ist, wie bereits gesagt wurde, noch nicht vollständig aufgeklärt. Das allgemeinste theoretische Resultat ist das von Larmor (*Phil. Mag.* Dez. 1897), daß für jedes auch noch so komplizierte Atomsystem, wenn alle in Bewegung befindlichen Elektronen negativ sind, und die Anziehung der positiven nach dem Zentrum gerichtet ist, jede Linie in drei einzelne Linien geteilt wird, genau wie es die provisorische Theorie von Zeeman und Lorentz verlangt.

Man könnte auf den ersten Blick geneigt sein anzunehmen, daß sich die Bahnen drehen und senkrecht zu den Kraftlinien stellen müßten, wie es so viele Kreisströme tun; allein man darf die Trägheit des bewegten Elektrons nicht vergessen. Da nämlich das umlaufende Elektron einen Kreisstrom bildet, so hat es jedenfalls das *Bestreben,* sich mit seiner Ebene senkrecht zu den Kraftlinien zu stellen; da aber das umlaufende Elektron nach der Hypothese Trägheit besitzt, stellt sich der Strom nicht so ein, sondern er gibt der ablenkenden Kraft indirekt nach wie ein Kreisel oder wie die abgeplattete Erde, deren Rotationsachse — wie Newton in den Prinzipien auseinandergesetzt hat — eine konische Bewegung um die Kraftlinien machte, eine Bewegung, die man bei der Erde die Präzession der Aequinoktien und bei dem strahlenden Atom den Zeemaneffekt nennt.

Die beschriebenen Erscheinungen bilden den Hauptteil des Zeemaneffektes, und dieser kann als die fundamentalste Störung angesehen werden, die ein Magnetfeld auf eine Strahlungsquelle ausübt. Es können aber ebenso wie bei der Erde noch andere kleinere Störungen vorkommen; die Erdachse ist nicht nur der Präzession, sondern auch der Nutation unterworfen, einer nicken-

den Bewegung, die der Hauptbewegung superponiert ist. Es ist auch möglich, daß die mittlere Linie oder die beiden äußeren Linien oder alle drei zugleich verdoppelt sind; so entsteht nicht nur das normale Triplet, sondern ein Quartet oder ein Quintet oder selbst ein Nonet, Erscheinungen, die von Zeeman und anderen beobachtet und photographiert worden sind. Das bemerkenswerte Staffelspektroskop von Michelson ist gerade zur rechten Zeit erfunden worden, um auf Erscheinungen dieser Art Anwendung finden zu können; es dient nämlich hauptsächlich zur genauen Untersuchung eines kleinen Teils eines in anderer Weise hervorgebrachten Spektrums.

Selbst die beiden Bestandteile der Doppellinie des Natriums zeigen ein verschiedenes Verhalten, wenn die Lichtquelle magnetisiert und dann das Licht untersucht wird. Eine der Natriumlinien, D_2 (Fig. 15), die von Zeeman anfangs nur verbreitert gesehen wurde, wird ein Sextet. Die andere Natriumlinie, D_1, wird ein Quartet; und ein eingehendes Studium des Verhaltens aller dieser Linien und Liniengruppen, die verschiedene Substanzen unter Einfluß des Magnetismus geben, muß zu einer bedeutenden Erweiterung unserer Kenntnisse führen. Es ist kaum zu viel gesagt, daß die Entdeckung von Zeeman im Lichte der Theorie von Lorentz die Leistungsfähigkeit der Spektralanalyse für die Aufklärung der Strahlungsprozesse und der Eigenschaften der Atome verdoppelt hat. Sie hat ein neues Gebiet der Physik eröffnet, so zu sagen das Gebiet der Astronomie der Atome, in welcher die Atome und Elektronen die Rolle von Planeten und Satelliten spielen.

12. Kapitel.

Zunahme der Trägheit infolge schneller Bewegung.

Die Hypothese, zu welcher wir gekommen sind, ist die, daß die Trägheit eines Elektrons vollständig elektrischer Natur ist; sie erklärt sich durch die bekannte magnetische Wirkung einer bewegten elektrischen Ladung und die aus ihr entspringende Gegenwirkung gegen eine Änderung in dieser Bewegung.

Gewöhnlich wird die Trägheit als konstant und ganz unabhängig von der Geschwindigkeit betrachtet; aber jetzt entsteht die Frage, ob die Verteilung der Ladung auf einem geladenen Körper zusammen mit ihren Kraftlinien konstant und unverändert bleiben, wenn sich der Körper schnell bewegt; denn wenn sich die Verteilung der Kraftlinien ändert, so ändert sich die aus ihrer seitlichen Bewegung entspringende Trägheit wahrscheinlich ebenfalls. Zur weiteren Aufklärung muß auf das 2. Kapitel verwiesen werden.

Man stelle sich z. B. vor, die elektrischen Kraftlinien eines bewegten Körpers würden mehr nach der Achse oder der Bewegungsrichtung hin konzentriert; dies würde zur Folge haben, daß die seitliche Komponente ihrer Bewegung kleiner wird, daß also die magnetische Kraft, welche die seitliche Komponente erzeugt, kleiner wird, und daß folglich die scheinbare oder elektromagnetische Trägheit der bewegten Ladung kleiner wird.

Wenn dagegen die Linien auseinandergingen und sich gegen den Aequator, d. h. die auf der Bewegungsrichtung senkrecht stehende Ebene hin konzentrierten, so würde eine größere Kom-

ponente ihrer Bewegung geeignet sein, ein Magnetfeld zu erregen; infolge dieser Konzentration würden also beide Felder an Intensität zunehmen und die Trägheit würde größer werden.

Es ist demnach möglich, daß die elektrische Trägheit in irgend einer Weise von der Geschwindigkeit abhängt, etwas was in der gewöhnlichen Mechanik unbekannt ist. Ich behaupte nicht, daß in der gewöhnlichen Mechanik eine solche Abhängigkeit nicht vorhanden ist; im Gegenteil, ich bin überzeugt, daß sie auch bei der Materie vorhanden ist, wenn sich diese nur hinreichend schnell — etwa über tausend Meilen in der Sekunde — bewegt; allerdings kann sie schwerlich in irgend einem Falle schneller Bewegung in der Astronomie einen merklichen Einfluß ausüben. Aber es unterliegt jedenfalls keinem Zweifel, daß nach der Theorie die elektromagnetische Trägheit bei sehr großer Geschwindigkeit größer werden muß, und Heaviside hat den Betrag derselben schon vor langer Zeit berechnet.

Man muß bedenken, daß eine in Bewegung befindliche Ladung kreisförmige magnetische Kraftlinien erzeugt. Diese magnetischen Linien sind nun aber nicht stationär, sondern sie bewegen sich mit derselben Geschwindigkeit wie der Körper; infolgedessen erzeugen sie neue elektrostatische Linien, d. h. sie bewirken eine elektrische Verschiebung von der Achse hinweg, und diese Verschiebung wird der ursprünglichen von der Ladung herrührenden radialen Verschiebung (vom Zentrum hinweg oder nach diesem hin) superponiert.

Bei gewöhnlichen, wenn auch noch so großen Geschwindigkeiten ist diese sekundäre elektrische Wirkung unbedeutend, aber sie ist immer da und darf nicht ignoriert werden, wenn die Geschwindigkeit ungemein hoch wird. Sie macht sich sehr bemerklich, wenn sich die Geschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert, aber bei jeder Geschwindigkeit, die viel kleiner ist als diese, ist eine solche sekundäre Wirkung so gering, daß sie vernachlässigt werden kann.

Die Wirkung besteht darin, daß sie, wie die beigefügte Figur zeigt, die Anordnung der Kraftlinien verändert; diese entfernen sich von den Polen und konzentrieren sich nach dem Aequator, der geladenen Kugel hin, wenn die Geschwindigkeit sehr groß ist; schließlich würden sie vollständig in oder parallel der Aequa-

torialebene konzentriert werden, wenn die Geschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit werden könnte. Und die elektrischen Kraftlinien würden dann zu einem Fächer oder einer äquatorialen Bürste auseinanderfliegen, wie die Speichen eines Rades, welches sich mit riesiger Geschwindigkeit eine verlängerte Achse entlang bewegt, wobei der Umfang des Rades die Richtung des Magnetfeldes repräsentiert; aber gerade diese Kondensation verstärkt das Feld in einem solchen Grade, daß die Trägheit schließlich unendlich groß wird.

Man könnte annehmen, daß die neue Anordnung der Linien so zu verstehen ist, daß die Verteilung der Ladung selbst durch die Bewegung verändert wird, so daß die gesamte Ladung auf dem Aequator konzentriert wird, von dem die Kraftlinien wie

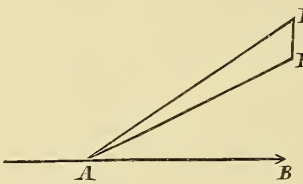


Fig. 16.

A ist die Ladung. *AB* ist ihre Bewegungsrichtung und *AE* ihre elektrische Kraft in einer gewissen Richtung, wenn sie stationär ist; *EF* ist die von der Bewegung herrührende magnetisch induzierte elektrische Komponente und *AF* ist die resultierende elektrische Kraft, welche die ursprüngliche Kraft *AE* ersetzt. Die magnetische Kraft, durch deren Bewegung *EF* hervorgerufen wird, steht auf der Ebene der Zeichnung senkrecht und ist selbst durch die Bewegung hervorgerufen; daher ist *EF* eine Größe zweiter Ordnung und klein für Geschwindigkeiten, welche erheblich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit sind.

gewöhnlich normal zur Oberfläche ausgehen. Diese Vorstellungen bieten jedoch Schwierigkeiten (siehe Anhang K) und es ist leichter anzunehmen, daß die Ladung ihre Verteilung auf der Oberfläche der Kugel unverändert beibehält und daß jede Kraftlinie von ihrem ursprünglichen Punkt ausgeht, daß sie aber nicht mehr in einer Richtung senkrecht zur Oberfläche ausgeht, wenn sie in schneller Bewegung ist, sondern daß sie gegen den Aequator hin geneigt ist, um die oben beschriebene Anordnung hervorzubringen; ähnlich wie bei einem Erdrutsch die Wurzeln der Bäume in ihrer ursprünglichen Stellung bleiben, während sich die Stämme nach

und nach der vertikalen Richtung anpassen, so daß sie nicht mehr auf dem Boden senkrecht stehen.

Wie die Frage zu beantworten ist, hängt ganz davon ab, welche Hypothese wir über die innere Struktur des Elektrons machen. Wenn wir es mit einem vollkommen leitenden Körper vergleichen, der eine elektrische Ladung besitzt, so muß die Ladung auf die Oberfläche beschränkt sein; und es läßt sich beweisen, wie Heaviside getan hat, daß die Verteilung gleichförmig bleiben wird (vgl. Larmor, *Aether and Matter,* S. 154). Man kann es aber auch mit einer gleichförmig geladenen festen Kugel vergleichen. Es mag etwas sein, wovon wir bis jetzt noch keine Vorstellung haben; allein die Versuche von Kaufmann genügen vielleicht um zu beweisen, daß es, was auch seine Struktur sein mag, um einen Mittelpunkt herum symmetrisch ist in der gegewöhnlichen Weise geschichteter sphärischer Verteilung.

Anderseits lassen sich diese Betrachtungen vermeiden, indem man die Ladung lediglich als einen geometrischen Punkt behandelt, von dem die Kraftlinien ausgehen, und seine Gestalt und Größe sowie sein etwaiges Leitungsvermögen ganz ignoriert. Dies ist der Grundton von Larmors Behandlung in seinem Buch *Aether and Matter,* sowie auch in seinen früheren Abhandlungen; wo es sich um die Struktur der Atome handelt, wird angenommen, daß die Elektronen im Atom sich in Entfernungen voneinander befinden, die im Vergleich mit ihren Radien groß sind. Vergl. die grundlegende Untersuchung im 11. Kapitel, die weiter unten erwähnt werden wird. Wir können schwerlich *a priori* sagen, welche Behandlung den Tatsachen am besten entspricht, aber es wird sich zeigen (s. 13. Kap.), daß die zweite Behandlungsweise nicht nur einfacher ist, sondern daß sie mit den Tatsachen in Einklang steht, indem sie Zahlenresultate liefert, die mit den Ergebnissen experimenteller Messungen ausgezeichnet übereinstimmen.

Jedenfalls kann das Problem in folgender Weise in Angriff genommen werden:

Die durch Bewegung erzeugte magnetische Kraft ist der Geschwindigkeit der Bewegung proportional. Die sekundäre elektrostatische Kraft, welche durch die Bewegung dieses magnetischen Feldes erzeugt wird, ist ebenfalls derselben Geschwindigkeit pro-

portional.[1]) Daher ist die Störung des ursprünglichen gleichförmigen elektrostatischen Feldes von der zweiten Ordnung, u^2/v^2; und wenn es gestattet ist, Größen dieser Ordnung zu vernachlässigen, so wird das Feld und also die Trägheit der bewegten Ladung immer noch so gut wie konstant sein.

Wenn aber ihre Geschwindigkeit anfängt, sich der Lichtgeschwindigkeit zu nähern, wenn auch nur etwa einem Zehntel dieser Geschwindigkeit, so ist eine merkliche Störung zu erwarten, und es muß eine Zunahme der Trägheit von ungefähr ein Prozent eintreten.

---

1) Der Wert der magnetischen Kraft in einen beliebigen Punkt P, herrührend von einer Ladung e, die sich mit der Geschwindigkeit u bewegt, ist in Polarkoordinaten r, ϑ

$$H = \frac{e\,u \sin \vartheta}{r^2},$$

und ist in Ringen um die Bewegungsrichtung u wirksam. Sie ist in der Figur nicht sichtbar, weil sie in P auf der Ebene der Zeichnung senkrecht steht.

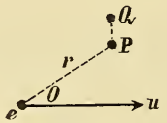


Fig. 17.

Die elektrische Kraft, welche durch Bewegung in diesem magnetischen Feld erzeugt oder induziert wird — die notwendigerweise auf der Bewegungsrichtung senkrecht steht — ist $\mu H u$; sie ist also in diesem Fall

$$\frac{\mu\, e\, u^2 \sin \vartheta}{r^2}.$$

Dies ist die sekundäre oder induzierte E. M. K., die in jedem Punkt der primären oder direkten elektrischen Kraft der Ladung selbst längs der Linie e P, nämlich $e/\varkappa^2$. superponiert werden muß; und sie wirkt in der Richtung P Q, da sie auf dem magnetischen Feld und auf der Bewegungsrichtung senkrecht steht. Also ist das Verhältnis der induzierten zur ursprünglichen E. M. K. in jedem Punkt in einer Richtung ϑ, von der Ladung und der Bewegungsachse aus gerechnet,

$$\mu \varkappa u^2 \sin \vartheta, \text{ was gleich } \frac{u^2}{V^2} \sin \vartheta \text{ ist.}$$

Infolgedessen wird die ursprüngliche Richtung des stationären elektrischen Feldes, e P, in eine Richtung wie e Q verschoben.

Der Theorie gemäß muß die Trägheit unendlich sein, wenn die Geschwindigkeit diejenige des Lichtes erreicht (s. Anhang K), doch ist es wahrscheinlich nicht nötig, daß das Maximum der Geschwindigkeit erreicht wird, wenn die Ladung kein absoluter Punkt ist; jedenfalls ist aber dann die Trägheit sehr groß, und es ist vielleicht überhaupt unmöglich, Materie oder wenigstens geladene Materie mit einer Geschwindigkeit zu bewegen, die größer als die Lichtgeschwindigkeit ist. Unter Umständen ist es aber doch möglich, ebenso wie es möglich ist, daß sich eine Flintenkugel durch die Luft mit einer Geschwindigkeit bewegt, die größer als die Schallgeschwindigkeit ist. Ermöglicht wird dies durch die heftige adiabatische Verdichtung der Luft vor einer solchen Kugel, wodurch die Geschwindigkeit des Schalls auf den erforderlichen Wert gesteigert wird, und die Furche hinter ihr, wo sich Diskontinuität bemerklich macht. Es ist unwahrscheinlich, daß sich der Äther einer Geschwindigkeit anpassen kann, die die Lichtgeschwindigkeit erheblich übersteigt, ohne eine Änderung der Struktur zu erleiden, die einem Bruch in einem materiellen Medium vergleichbar sein würde.

Heaviside und Professor J. J. Thomson haben nachgewiesen, daß, wenn die Geschwindigkeit der Bewegung größer als die Lichtgeschwindigkeit ist, der Fächer oder die Radialebene der Kraftlinien sich rückwärts biegt und eine Kegelfläche bildet, die sich bei zunehmender Geschwindigkeit immer mehr schließt, ebenso wie die erwähnte kegelförmige Diskontinuitätsfläche, die eine hinreichend schnell fliegende Kugel begleitet, und die in Boys' Kugelphotographien zu sehen ist.

Man kennt keine Bewegung gewöhnlicher Materie, deren Geschwindigkeit hinreichend sein würde, um eine merkliche Änderung der Trägheit zu bewirken. Die größte Geschwindigkeit, die uns zu Gebote steht, ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Erde um die Sonne bewegt, 19 Meilen in der Sekunde, also 60 mal so groß als die Geschwindigkeit einer Kanonenkugel; allein die Geschwindigkeit der Erde ist nur $\frac{1}{10\,000}$ der Lichtgeschwindigkeit. Folglich würde eine durch die Bewegung der Erde um die Sonne hervorgerufene falsche Trägheit nur ein Teil in hundert Millionen sein; aber selbst die Genauigkeit der Astronomie würde nicht imstande sein, einen Effekt von dieser Größenordnung zu entdecken.

Es gibt einige wenige Sterne, die sich mit einer Geschwindigkeit von 200 Meilen in der Sekunde bewegen, aber selbst diese Geschwindigkeit ist nur ein zehntel Prozent der Lichtgeschwindigkeit, und der Trägheitsüberschuß würde ein Teil in einer Million sein. Bis zum Jahr 1903 war die einzige bekannte Stelle, wo sich Ladungen oder geladene Atome mit einer größeren Geschwindigkeit als diese bewegen, die Vakuumröhre. Hier fliegen die von der Kathode fortgeschleuderten Teilchen mit einer Geschwindigkeit von 20000 Meilen in der Sekunde, d. h. $\frac{1}{10}$ der Lichtgeschwindigkeit, und sie mögen 1 Prozent überschüssige Trägheit haben oder mehr, wenn ihnen eine größere Geschwindigkeit erteilt werden kann.

Jetzt kennt man aber größere Geschwindigkeiten, nämlich die bei der spontanen Emission von Elektronen und Atomen durch radioaktive Substanzen; es ist daher von größtem Interesse, für derartige Strahlen die Konstanten, namentlich die Trägheit zu bestimmen.

13. Kapitel.

Berechtigung der elektrischen Theorie der Trägheit.

Zunächst müssen wir aber fragen, welche Berechtigung die Ansicht hat, daß jede der isolierten Korpuskeln über die Messungen ausgeführt worden sind, eine rein elektrische Korpuskel oder ein rein elektrisches Elektron ist ohne materiellen Kern, dessen sämtliche Eigenschaften in Einklang mit rein elektrischen und magnetischen Gesetzen erklärt werden müssen. Sodann können wir dazu übergehen, die zuerst von Larmor (*Phil. Trans.*, 185 A, 813; 1894) versuchsweise aufgestellte und durch ein mechanisches Bild erläuterte weitere Theorie zu diskutieren, daß die Materie aus Elektronen besteht, daß die Atome der Materie aus elektrischen Ladungen zusammengesetzt sind, daß die Trägheit, diese fundamentale Eigenschaft der Materie, mit Selbstinduktion identisch ist.

Von philosophischem Standpunkt aus muß es als unzulässig angesehen werden, für die Erklärung einer Erscheinung zwei Methoden zu fordern. Wenn die Trägheit aus den Erscheinungen bewegter Ladungen elektrisch erklärt werden *kann*, so ist es überflüssig noch eine andere Erklärung für die Erscheinung zu verlangen. Dies ist aber nicht alles, was gesagt werden kann; es ist sehr leicht möglich, daß binnen kurzem der direkte experimentelle Beweis erbracht wird. Eine von Professor J. J. Thomson vorgeschlagene Methode, die Natur der Korpuskeln zu untersuchen, stützt sich auf das Verhältnis zwischen Strahlung und Wärmeenergie, die entwickelt werden, wenn Korpuskeln auf einen Schirm prallen, der sie plötzlich anhält. Insofern sie aus nichtelektrischer Materie bestehen, würden sie bei ihrem Aufprallen

nur Wärme erzeugen, ohne direkt zur Entstehung von Ätherwellen Veranlassung zu geben; insofern sie aus elektrischen Ladungen bestehen, würden sie einen gewissen Betrag von Strahlungsenergie zerstreuen; und so könnte das Verhältnis von Strahlung und Wärme ein Unterscheidungsmittel bieten.[1]) Bis jetzt sind jedoch in dieser Richtung keine hinreichenden Messungen ausgeführt worden.

Es gibt aber vielleicht einen anderen Weg, zu einem entscheidenden Resultat zu kommen. Wenn sich eine elektrische Ladung mit einer Geschwindigkeit bewegt, die der Lichtgeschwindigkeit nahekommt, so ist, wie wir gesehen haben, ihre Trägheit nicht mehr konstant, sondern sie nimmt sehr schnell zu und wird unendlich, wenn die Lichtgeschwindigkeit erreicht wird; und von einigen mathematischen Physikern sind für diese Geschwindigkeitsträgheit auf Grund verschiedener Ansichten über die Konstitution des Elektrons ziemlich komplizierte und verschiedene Ausdrücke berechnet worden. Man vergleiche über diesen schwierigen Gegenstand Anhang K. Es ist möglich, daß diese Tatsache uns den nötigen Aufschluß gibt.

In gewissen Fällen der Erzeugung von Kathodenstrahlen, wenigstens von β-Strahlen ist nämlich eine Geschwindigkeit erreicht worden, die nicht weit hinter der Lichtgeschwindigkeit zurückbleibt, und in solchen Fällen können die Wirkungen der erhöhten Trägheit beobachtet werden. Eine solche experimentelle Bestimmung ist ganz vor kurzem von Dr. Kaufmann[2]) unternommen und mit großem Geschick ausgeführt worden; er benutzte die oben (5. Kap.) beschriebene Methode, welche darin besteht, gleichzeitig die elektrische und die magnetische Ablenkung zu vergleichen, die dasselbe Strahlenbündet erleidet, welches von einer kleinen Menge Radium ausgeht und auf das gleichzeitig ein elektrisches und ein magnetisches Feld von derselben Richtung einwirken. Das Radium gibt Strahlen von verschiedenen Geschwindigkeiten ab, die in verschiedenem Grade abgelenkt werden und so eine Art Kometenschweif bilden (siehe Fig. 18); und es ist der schwache Eindruck, den sie auf eine photogra-

1) Siehe J. J. Thomson, *Phil. Mag.* April 1899, S. 416.
2) Siehe *Comptes Rendus* vom 13. Oktober 1902.

phische Platte in einem hohen Vakuum hervorbringen, welcher gemessen wird und die Daten liefert. Die Geschwindigkeit und das Verhältnis e/m sind aber beide bekannt, und — um kurz das Resultat zusammenzufassen — Kaufmann fand, daß, wenn die Geschwindigkeiten sich merklich der Lichtgeschwindigkeit nähern, das elektrochemische Aequivalent m/e genau um den Betrag zunimmt, den die rein elektrische Theorie erfordert, d. h. die Theorie, welche die gesamte Trägheit der Wirkung der Elektrizität zuschreibt. Es ergab sich, daß kein quantitativer Raum für irgendwelche Extraträgheit vorhanden war, wie die Trägheit eines Teilchens nichtelektrischer Materie, welches sich mit jedem Projektil fortbewegt, dabei seine Trägheit bei allen Geschwindigkeiten konstant hält und daher nichts zu der Erhöhung der Trägheit beiträgt, die sich bemerklich macht, wenn sich die Geschwindigkeit merklich der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Wir wollen jetzt dazu übergehen, diese wichtige Materie eingehender zu betrachten.

Beweis für die rein elektrische Natur der Trägheit der vom Radium fortgeschleuderten β-Teilchen.

Man hat allen Grund für die Annahme, daß die vom Radium ausgesandten β-Strahlen mit den Kathodenstrahlen, die man in einer Vakuumröhre beobachtet, identisch sind; denn beide bestehen aus einer großen Anzahl von Elektronen oder Korpuskeln, die sich mit ungeheurer Geschwindigkeit bewegen; und wenn man diese Geschwindigkeit und das elektrochemische Aequivalent für die β-Strahlen bestimmt, z. B. dadurch, daß man sie durch ein magnetisches und ein elektrostatisches Feld ablenkt, was das einfachste Mittel ist, so erhält man ganz ähnliche Zahlen wie für die Kathodenstrahlen, nämlich für m/e den Wert von 10^{-7} in elektromagnetischen Einheiten, und für u einen Wert von der Ordnung 10^9 Zentimeter pro Sekunde.

Das Radium sendet jedoch unter günstigen Umständen seine Teilchen mit einer Geschwindigkeit aus, die größer als diese ist und sich in manchen Fällen der Grenzgeschwindigkeit, d. h. der Geschwindigkeit des Lichtes nähert. Dies ist das äußerst wichtige Resultat, welches von W. Kaufmann erhalten wurde, der auch für diesen Fall eine bewundernswerte Reihe von Bestim-

mungen der Geschwindigkeit und des elektrochemischen Aequivalents ausgeführt hat. Von welcher Wichtigkeit es ist, diese außerordentlich hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, ist einleuchtend, weil wir dadurch in den Stand gesetzt werden, die elektrische Theorie der Trägheit zu prüfen. Theoretisch ist die Trägheit bei hohen Geschwindigkeiten nicht konstant, sondern sie nimmt nach einem komplizierten aber berechneten Gesetz zu; wir können nicht annehmen, daß sich die elektrische Ladung in irgend einer Weise mit der Bewegung ändert; daher ist das elektrochemische Aequivalent m/e einfach der Masse proportional, und es muß eine Funktion der Geschwindigkeit u sein, annähernd konstant für gewöhnliche Werte, aber schnell zunehmend, wenn sich die Ceschwindigkeit der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Um Zahlenwerte zu erhalten, können wir die Theorie benutzen, die Heaviside und J. J. Thomson über die Zunahme der Bewegungsgröße einer fliegenden elektrischen Ladung über den natürlichen Wert von $m\,u$ hinaus entwickelt haben, d. h. den Wert für konstantes m und gewöhnliche Geschwindigkeiten.

Die Formel, welche Thomson für die numerische Berechnung benutzte, ist eine von denen, die er in seinen *Recent Researches* gibt; in seinen *American Lectures on Electricity and Matter,* S. 44, ist sie in folgender Weise angeführt:

$$m\,u = \text{elektrische Bewegungsgröße}$$

$$= \frac{e^2}{2\,a}\,\frac{v^2}{(v^2-u^2)^{\frac{1}{2}}}\left\{\vartheta\left(1-\frac{1}{4}\,\frac{v^2}{u^2}\right)+\frac{1}{2}\,\sin 2\vartheta\left(1+\frac{1}{4}\,\frac{v^2}{u^2}\cos 2\vartheta\right)\right\},$$

wo $\sin\vartheta = u/v$ ist; dies läßt sich in einer ziemlich einfachen Form in folgender Weise aussprechen:

Die Bewegungsgröße einer Partikel Elektrizität, die sich mit ungeheurer Geschwindigkeit bewegt, ist größer als die Bewegungsgröße derselben Partikel, wenn ihre Masse als konstant angesehen wird, in einem durch den folgenden Ausdruck gegebenen Verhältnis; in demselben ist das Verhältnis der Geschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit, u/v, als der Sinus eines gewissen Winkels ϑ ausgedrückt:

$$\frac{0{,}75}{4\sin^2\vartheta\sin 2\vartheta}\left\{(4\sin^2\vartheta-1)\,2\vartheta+(4\sin^2\vartheta+\cos 2\vartheta)\sin 2\vartheta\right\}.$$

Wir wollen dies das Verhältnis $\varphi(\vartheta)$ nennen. Es ist das Maß für die falsche Trägheit oder die Extraträgheit, die von der schnellen Bewegung herrührt, das Verhältnis der Masse bei der Geschwindigkeit u zu der stationären Masse. Wir können es zum Zwecke der Berechnung vielleicht noch besser in folgender Weise schreiben:

$$\frac{m}{m_0} = \varphi(\vartheta) = \frac{3}{8}\left(\frac{1-2\cos 2\vartheta}{1-\cos 2\vartheta} \cdot \frac{2\vartheta}{\sin 2\vartheta} + \frac{2-\cos 2\vartheta}{1-\cos 2\vartheta}\right) \quad . . (1)$$

Die höchsten von Kaufmann gemessenen Geschwindigkeiten waren nun die folgenden:

2,36; 2,48; 2,59; 2,72; 2,85 mal 10^{10} cm pro Sekunde,

während die Lichtgeschwindigkeit bekanntlich $3{,}0 \times 10^{10}$ cm pro Sekunde ist; die den angegebenen Werten der Geschwindigkeit entsprechenden Verhältnisse u/v sind also beziehungsweise

0,787; 0,817; 0,863; 0,907; 0,95.

Diese Zahlen repräsentieren also die Werte von $\sin\vartheta$, die in die obige Formel eingesetzt werden müssen, um den theoretischen Wert $\varphi(\vartheta)$ zu erhalten, nämlich das Verhältnis, welches angibt, wie vielmal das Verhältnis einer elektrischen Ladung bei der betreffenden hohen Geschwindigkeit die Masse bei niedriger Geschwindigkeit übersteigt.

Die den obigen Geschwindigkeiten entsprechenden Werte von $\varphi(\vartheta)$ sind nach J. J. Thomson

1,5; 1,66; 2,0; 2,42; 3,1,

und diese müssen durch direkte Beobachtung oder Messung der scheinbaren oder wirksamen Masse in jedem Fall verglichen werden.

Nun waren die von Kaufmann experimentell beobachteten Werte für diese Größen, d. h. der Faktor, um den die bewegte Masse dieselbe Masse im stationären Zustand übertraf, die folgenden:

1,65; 1,83; 2,04; 2,43; 3,09;

es zeigt sich also eine bemerkenswerte Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie, namentlich bei den höheren Geschwindigkeiten.

Also ist bei der höchsten Geschwindigkeit, die jemals für ein materielles Teilchen, jedenfalls für ein Elektron beobachtet worden ist, nämlich $2{,}85 \times 10^{10}$ cm pro Sekunde oder sechshundert Millionen Meilen pro Stunde, die Masse des Teilchens dreimal so groß als der gewöhnliche Wert; und die Bewegungsgröße sowie die Energie sind natürlich in demselben Verhältnis vergrößert.

Eine so überraschende Übereinstimmung zwischen Theorie und Beobachtung wie die obige beseitigt für mich allen Zweifel an der Richtigkeit der Hypothese, daß die Trägheit der Elektronen elektrische Trägheit ist. Nach meiner Ansicht ist diese große Übereinstimmung besonders deshalb überraschend, weil sie nicht die erste Folgerung bildete, die der Experimentator, W. Kaufmann, aus den Versuchsresultaten zog; er schloß vielmehr, daß die elektrische Masse ungefähr ein Drittel oder ein Viertel des Ganzen bildet; dann aber benutzte er eine andere (im Anhang K gegebene) Formel zur Berechnung, welche annimmt, daß sich der geladene Körper wie eine leitende Kugel verhält. Als aber dann unter Mitwirkung von M. Abraham die oben erwähnten Heavisideschen Ausdrücke richtig angewandt wurden, ergaben sich Resultate, die mit den obigen gut übereinstimmten. Die durch die genannten Zahlen zum Ausdruck kommende Übereinstimmung wurde von Professor J. J. Thomson erhalten, indem er seine eigne Theorie auf die Resultate Kaufmanns anwandte, wobei er von der Annahme ausging, daß sich die Ladung wie ein wirksamer Punkt verhält.

Wenn in Zukunft behauptet werden sollte, daß ein Elektron außer der elektrischen Ladung einen materiellen Kern enthält, so würden diejenigen, welche diese Behauptung aufstellen, den Beweis für die Richtigkeit derselben zu erbringen haben. Die Hypothese, welche jetzt das Feld behauptet, ist die rein elektrische.

Hiermit ist jedoch keineswegs eine elektrische Theorie für alle Materie aufgestellt. Die Trägheit eines Elektrons ist rein elektrisch, aber wie verhält es sich mit der Trägheit eines Atoms? Wer weiß, daß das Atom ganz aus Elektronen besteht? Bis jetzt wissen wir dies nicht.

Nichtsdestoweniger befinden wir uns soeben in einem äußerst wichtigen Gebiete der modernen Physik, und es ist wünschenswert, etwas mehr in die Einzelheiten des Gegenstandes einzugehen, als es in der vorhergehenden vorläufigen Skizze geschehen ist.

14. Kapitel.

Messung der Geschwindigkeit und der Masse der Teilchen zusammengesetzter Strahlen vermittelst der Methode der elektrischen und magnetischen Ablenkungen.

Die im 5. und 6., sowie im 9. Kapitel gegebenen Methoden für die Messung von u und e/m ließen die Bestimmung sehr einfach erscheinen, wenn dafür gesorgt wurde, daß man den Apparat *im Vakuum* hat, so daß das störende Leitungsvermögen der Luft eliminiert ist und man die elektrische Ablenkung unverfälscht erhält, was, wie J. J. Thomson zuerst gefunden hat, ausführbar ist. Nach der in den genannten Kapiteln gegebenen einfachen Theorie wurde jedoch angenommen, daß die zu messenden Größen konstant seien, und daß die zu beobachtende Ablenkung in jedem Falle eine einfache Ablenkung sei, die einer genauen Messung fähig ist; dies ist aber oft keineswegs der Fall, da die Teilchen verschiedene Geschwindigkeiten haben; und wenn sich, wie beim Radium, einige der Geschwindigkeiten der Lichtgeschwindigkeit nähern, kann es unmöglich der Fall sein, da sich dann die Trägheit selbst in komplizierter Weise mit der Geschwindigkeit ändert und als variabel behandelt werden muß. Man kann dies leicht übersehen, da es etwas ungewöhnliches in der Mechanik ist. Die Ablenkung kann also in solchen Fällen keine einfache sein, sondern die Strahlen müssen sozusagen zu einem Spektrum ausgebreitet werden (siehe Fig. 18); und da dieses Spektrum kontinuierlich ist, besitzt es keine Merkmale, die uns etwas wie Messung mit ihm vorzunehmen ermöglicht, wenn nicht ein weiterer Kunstgriff angewandt wird, etwa wie der, den Kundt bei den Versuchen über anomale Dispersion anwandte.

Die Versuche von W. Kaufmann in Göttingen wurden genau in dieser Art ausgeführt, und sie lassen sich in folgender Weise zusammenfassen. Die Strahlen wurden gleichzeitig der Einwirkung eines elektrischen und eines magnetischen Feldes ausgesetzt, wobei die beiden Felder so wirkten, daß sie nicht ihre Wirkung gegenseitig aufhoben, sondern daß die beiden Ablenkungen aufeinander senkrecht standen. Wenn in diesem Falle die von einer punktförmigen Quelle ausgehenden Strahlen durch das Doppelfeld hindurchgehen und dann auf eine in geringer Entfernung aufgestellte photographische Platte fallen, so ist zu erwarten, daß die beiden Spektra zu einem einzigen Spektrum vereinigt werden,

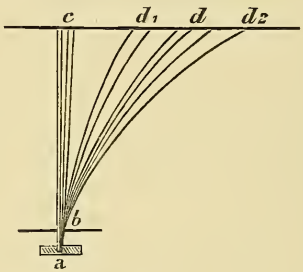


Fig. 18.

Ablenkung der Strahlen von hoher Geschwindigkeit, die vom Radium ausgehen. Das Radium befindet sich in einer Vertiefung in einem Bleiblock *a*; die Strahlen gehen durch eine Öffnung *b* und werden durch das magnetische Feld zu einem Spektrum $d_1 d_2$ ausgebreitet; die γ-Strahlen oder irgendwelche ungeladene Strahlen bringen einen Eindruck bei *c* auf der photographischen Platte *cd* hervor, die von sämtlichen Strahlen getroffen wird. In einem gleichförmigen Feld ist jede der Linien *a b d* ein Kreis.

welches mit der Lage der Einzelspektra einen Winkel bildet, der von der relativen Stärke der beiden Felder abhängt. Ob aber das so erzeugte geneigte Spektrum eine gerade Linie oder eine Kurve ist, hängt von Umständen ab. Alles was ohne weitere Untersuchung gesagt werden kann, ist das, daß jeder Punkt des Spektrums ein bestimmtes Ablenkungsverhältnis und also eine bestimmte Trägheit und Geschwindigkeit repräsentiert für jedes der Teilchen, welche den Eindruck an dieser Stelle hervorgebracht haben. Und da die Teilchen von verschiedenen Geschwindigkeiten an verschiedene Stellen des Spektrums kommen, so ist es möglich diejenigen Punkte aufzufinden, welche den größten Geschwindigkeiten entsprechen und also das Verhältnis der beiden

Ablenkungen für verschiedene Geschwindigkeiten zu vergleichen, wenn sich in irgend einer Weise die einem jeden Punkte entsprechende Geschwindigkeit bestimmen läßt.

Zur vollständigen Theorie ist eine kleine Berechnung erforderlich, die sogleich gegeben werden soll; zunächst will ich den benutzten Apparat beschreiben.

Apparat von W. Kaufmann.

Eine geringe Menge Radiumsalz in einer Messingbüchse dient als Strahlungsquelle, und ein Bündel der Strahlen geht durch eine Öffnung von ungefähr einem halben Millimeter Durchmesser in einer Platinplatte, die sich in einer Entfernung von 2 cm von der Strahlungsquelle befindet; auf ihrem Wege gehen sie zwischen zwei parallelen und isolierten Messingplatten hindurch, die ungefähr 2 Millimeter voneinander entfernt und mit einer Hochspannungsbatterie von 2000 bis 5000 Volt verbunden sind. Nachdem sie dann 2 Zentimeter weitergegangen sind, treffen sie die photographische Platte. Der Apparat befindet sich in einem stark evakuierten Gefäß, und das Ganze steht zwischen den Polen eines großen Elektronmagnets, der ein nahezu gleichförmiges Feld gibt, und zwar so, daß das magnetische und das elektrische Feld in derselben Richtung superponiert sind und ihre Kraftlinien zusammenfallen.

Unter diesen Umständen beschreiben die Teilchen den Anfang einer Spirale, da sie um die magnetischen Linien gekrümmt und in der Richtung der elektrischen Linien abgelenkt werden; sobald sie das kombinierte Feld verlassen haben, gehen sie in ihrer abgelenkten Richtung weiter, bis sie die photographische Platte treffen. Die Teilchen mit geringer Geschwindigkeit, falls solche anwesend sind, werden von den begrenzenden Flächen zurückgehalten, und nur die mit sehr großer Geschwindigkeit erreichen die Platte; diese ist vor α-Strahlen durch Aluminiumfolie geschützt, während die nicht abgelenkten γ-Strahlen wahrscheinlich die direkte Schußlinie markieren und also den geometrischen „Ursprung“ der Kurve angeben würden, die man nach langer Exposition auf der Platte finden würde, eine Kurve, die man durch $y = f(x)$ bezeichnen kann, wobei y die elektrische und x die magnetische Ablenkung bedeutet.

Die Methode kann als die Methode der gekreuzten Spektra bezeichnet werden.

Die Theorie kann dann etwa in folgender Weise gegeben werden.

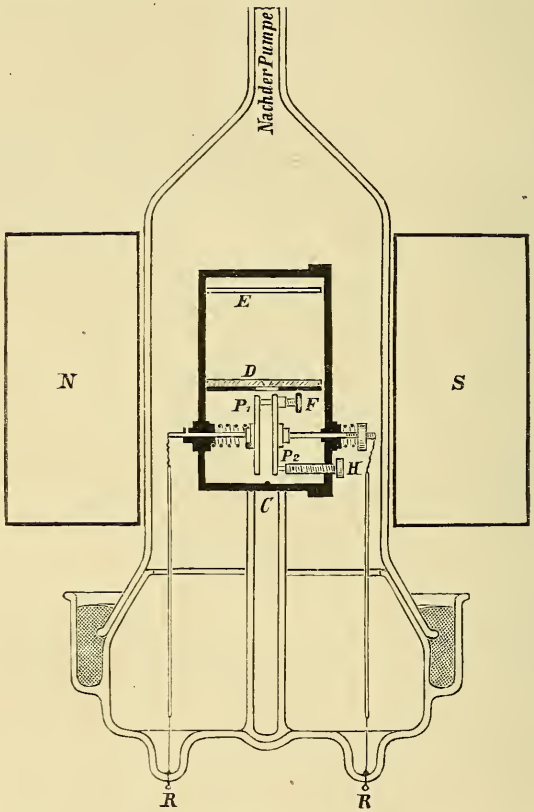


Fig. 19.

Kaufmanns Apparat zur gleichzeitigen Messung der elektrischen und magnetischen Ablenkung von Teilchen, die eine sehr hohe Geschwindigkeit besitzen. Die Strahlungsquelle ist eine geringe Menge Radium in einer Büchse bei *C*. Alle Strahlen, ausgenommen die von der höchsten Geschwindigkeit, werden durch den Magnet *NS* abgelenkt und unwirksam gemacht; einige der Strahlen von der höchsten Geschwindigkeit gehen durch die Öffnung *D* nach oben und werden zwischen den Platten P_1 P_2, die durch die Elektroden *R* so stark wie möglich elektrisiert werden, durch das magnetische Feld nach vorn und durch ein elektrisches Feld, dessen Linien mit den magnetischen Linien zusammenfallen, nach der Seite abgelenkt. Diese doppelt abgelenkten Strahlen fallen dann auf die photographische Platte *E*, auf der sie, mehr oder weniger der Figur 18 entsprechend, zu einem sehr kleinen schiefen Spektrum ausgebreitet werden; an diesem Spektrum werden dann mikrometrische Messungen vorgenommen.

Die Koordinaten eines Punktes des auf der Platte entwickelten Spektrums seien x und y, und zwar sei

x die magnetische nnd

y die elektrische Ablenkung.

Diese Ablenkungen können als Maß für die reziproken Werte der Radien r und r' der durch die Felder H und E erzeugten Krümmung angesehen werden. Mit Rücksicht auf die einfachen mechanischen Gleichungen

$$\frac{m u^2}{r} = \mu e \mathrm{H} u \quad \text{und} \quad \frac{m u^2}{r'} = \mathrm{E} e$$

erhält man also

$$\frac{x}{y} = \frac{r'}{r} = \frac{\mu \mathrm{H} u}{\mathrm{E}} = \frac{u}{k_1}; \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

k ist eine Konstante, die von den relativen Stärken der wirksamen Felder abhängt.

Wenn also die Teilchen, welche die Platte erreichen, sämtlich annähernd mit derselben Geschwindigkeit ausgesandt werden, so wird die photographische Kurve nahezu eine gerade Linie sein, deren Neigung ein Maß für diese Geschwindigkeit bildet.

Aus den obigen Gleichungen erhalten wir ferner für das elektrochemische Aequivalent

$$\frac{m}{e} = \frac{\mathrm{E} r'}{u^2} = \frac{\mu^2 \mathrm{H}^2}{\mathrm{E}} \cdot \frac{r^2}{r'} = k \frac{y}{x^2}; \quad \ldots \ldots \quad (2)$$

hier ist k eine andere Konstante, welche von den Versuchsbedingungen abhängt; wenn also die Massen der Teilchen alle gleich groß sind, so wird das photographische Spektrum eine Parabel sein.

Bei den höchsten Geschwindigkeiten ist aber m/e nicht konstant, sondern eine Funktion von u, mit $u = v \sin \vartheta$.

Wenn wir diese Funktion $\frac{m}{m_0} = \varphi\left(\frac{u}{v}\right) = \varphi\left(\frac{k_1}{v}\frac{x}{y}\right)$ nennen, so kommen wir zu den Schluß, daß die Gleichung der photographischen Kurve

$$\frac{x^2}{y} \varphi\left(\frac{k_1}{v}\frac{x}{y}\right) = k_2$$

ist, in welcher k_2 eine andere Konstante ist.

Bei den höchsten Geschwindigkeiten, wenn u die Lichtgeschwindigkeit v erreicht, kann sich u nicht viel ändern, da es sich einem Grenzwert nähert, und infolgedessen ist die zu erwartende Kurve annährend eine gerade Linie; das einzige, was sich schnell ändert, ist dann die Masse, die sich asymptotisch ihrem unendlich großen Grenzwert nähert und sich daher viel schneller ändert als u.

Die Bestimmung besteht also darin, daß man ein möglichst deutliches Bild für die Ausmessung erhält und dann durch Probieren eine Konstante k_1 so wählt, daß sie die Quadrate der Abweichungen des hier k_2 genannten Verhältnisses von seinem mittleren Wert so klein wie möglich macht.

Wenn es möglich ist, für die Konstante k_1 einen Wert zu finden, der den berechneten Wert von k_2 innerhalb der Grenzen der experimentellen Ungenauigkeit konstant macht, so ist bewiesen, daß die Form der theoretischen Funktion φ für diese Grenzen richtig ist, und wenn diese Funktion auf Grund der Hypothese berechnet war, daß die Masse rein elektrisch ist, so ist auch die Richtigkeit der Hypothese bewiesen, daß die Trägheit der β-Strahlen rein elektrischer Natur ist.

In den definitiven Versuchsreihen Kaufmanns betrug der Beobachtungsfehler nur 1,4 Prozent, was mit Rücksicht auf die zu überwindenden Schwierigkeiten als ein sehr günstiges Resultat bezeichnet werden muß.

Es ist ferner von Interesse, darauf hinzuweisen, daß Kaufmann für die β-Strahlen des Radiums bei normaler oder gewöhnlicher Geschwindigkeit für $\frac{e}{m_0}$ den Wert $1{,}84 \times 10^7$ C. G. S. fand, während nach einer von Dr. Simon in anderer Weise ausgeführten Bestimmung dieselbe Größe für die Kathodenstrahlen den Werth $1{,}865 \times 10^7$ hat, was ebenfalls mit dem ersteren Wert gut übereinstimmt. Daß diese Werte auch mit viel älteren von J. J. Thomson ausgeführten Messungen derselben Größe für Strahlen aus anderen Quellen übereinstimmen, braucht kaum hervorgehoben zu werden.

Die von Dr. Kaufmann benutzte Formel für die Trägheit war aus den Resultaten in einer Abhandlung von Searle in Cambridge unrichtig abgeleitet worden; auf Grund dieser Formel nahm Kauf-

mann anfangs an, daß nur ein Teil der Masse elektrisch sei. Es wurde aber von Dr. Abraham in Göttingen darauf hingewiesen, daß die so berechnete Trägheit nur die zur direkten Beschleunigung oder der Beschleunigung in der Bewegungsrichtung gehörige war; das, was fehlte, war die transversale Trägheit oder die zu einer ablenkenden Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung gehörige Trägheit. Diese erhält man aus dem Ausdruck für die transversale Kraft, der aus dem Ausdruck für die Energie in der gewöhnlichen Weise durch die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen abgeleitet werden kann; für hohe Geschwindigkeiten fällt der Wert derselben anders aus als für gewöhnliche Geschwindigkeiten; und als die von Dr. Abraham für sie aufgestellte Formel von Kaufmann bei seinen Berechnungen benutzt wurde, ergab sich, daß sie sehr genau mit der Annahme in Einklang steht, daß die gesamte Trägheit elektrisch ist.

Diese Formel, die natürlich für jede sphärisch geschichtete Anhäufung von Elektrizität gilt, besagt, daß das Verhältnis zwischen der transversalen Trägheit eines fliegenden Teilchens im ruhenden oder langsam bewegten Zustand das folgende ist:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3}{4}\psi(\beta) = \frac{3}{4\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\beta}\log\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right); \quad (2)$$

β ist das Verhältnis der Geschwindigkeit des Teilchens zur Lichtgeschwindigkeit.

Diese Formel ist nicht identisch mit der von Thomson benutzten, vielleicht weil die letztere von einer anderen Ansicht über die Natur des Elektrons ausgeht, aber sie gibt Resultate, die nicht wesentlich von denen der letzteren abweichen. Anfangs wurde sie auch nicht als absoluter Ausdruck benutzt, sondern als *Form* einer Funktion, die der Bestätigung bedurfte; allerdings wurde sie auch absolut benutzt. Kaufmann war schließlich befriedigt, als er fand, daß seine beobachtete Masse sich etwas, wenn auch nur wenig schneller und nicht langsamer änderte, als es die Theorie erforderte; wenn dann die Teilchen irgendwelche überschüssige Trägheit nichtelektrischen Charakters enthielten, so mußte eine solche unerklärte Trägheit einen negativen Wert haben, was vermutlich absurd sein würde.

Nach meiner Ansicht steht die Funktion Abrahams im absoluten Zahlenwert mit der Beobachtung nicht besser in Einklang als Thomsons Formel; auch erhalte ich aus Thomsons Formel nicht genau die Zahlen, welche er in seinem American Lectures anführt. Wir können aber hier nicht näher auf diese Differenzen eingehen, was auch nicht notwendig ist, denn sie betreffen nur Einzelheiten, die sich ohne Zweifel leicht aufklären lassen. Man wird erst dann auf sie eingehen müssen, wenn die Schwierigkeiten der experimentellen Beobachtungen weiter überwunden sind und genauere und zuverlässigere Resultate vorliegen.[1])

Von Kaufmanns Resultaten, die in der *Physikalischen Zeitschrift* 4, 1902/03, S. 55 veröffentlicht worden sind, habe ich die besten ausgewählt und mit Hilfe des auf S. 121 gegebenen Ausdruckes φ berechnet.

Die Resultate sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. Ich gebe Kaufmanns beobachtete Werte für x und y, sowie die von ihm angegebenen Werte für β oder u/v oder, wie ich es bezeichne, sin ϑ; sodann habe ich $\varphi(\vartheta)$, das theoretische Verhältnis m/m_0 nach Thomsons Theorie berechnet und die Werte von y/x^2 in einer Kolumne zusammengestellt; diese müssen mit den *experimentell* bestimmten Werten derselben Größe übereinstimmen, ihnen wenigstens proportional sein; in einer weiteren Kolumne gebe ich die Werte von $\frac{3}{4}\ \psi(\beta)$, d. h. dieselbe Größe nach der Formel von Abraham berechnet (S. 129). (Daß die Zahlenwerte von y/x^2 mit einem mittleren Massenverhältnis ohne einen anderen konstanten Faktor als Eins numerisch übereinstimmen, muß ein Zufall sein.)

1) Die Resultate von Kaufmanns späteren Arbeiten werden im Anhang M besprochen werden.

Abhängigkeit der Trägheit von der Geschwindigkeit.

Analyse von Kaufmanns letzten Versuchsresultaten.

Beobachtet:		Berechnet:							
Magnetische Ablenkung in Zentimetern x	Elektrische Ablenkung in Zentimetern y	Geschwindigkeit im Vergleich mit der Lichtgeschwindigkeit $0{,}389\,\frac{x}{y}$	Verhältnis u/v nach Kaufmanns Berechnung β oder $\sin\vartheta$	Hilfsgrößen: arc 2ϑ	Hilfsgrößen: sin 2ϑ	Hilfsgrößen: cos 2ϑ	Massenverhältnis m/m_0: J. J. Thomsons Theorie $\varphi(\vartheta)$	Massenverhältnis m/m_0: $\frac{y}{x}$	Massenverhältnis m/m_0: Abrahams Theorie $\frac{3}{4}\psi(\beta)$
0,150	0,0607	0,963	0,963	2,60	0,515	— 0,857	3,30	2,70	2,41
0,175	0,0720	0,945	0,949	2,50	0,597	— 0,802	2,85	2,35	2,14
0,200	0,0835	0,931	0,933	2,40	0,674	— 0,738	2,50	2,09	2,05
0,225	0,0991	0,883	0,383	2,165	0,829	— 0,559	2,00	1,96	1,73
0,250	0,1132	0,868	0,860	2,07	0,877	— 0,480	1,80	1,80	1,64
0,275	0,1290	0,829	0,830	1,96	0,925	— 0,381	1,66	1,70	1,54
0,300	0,1445	0,807	0,801	1,855	0,960	— 0,280	1,54	1,61	1,47
0,325	0,1630	0,775	0,777	1,78	0,978	— 0,208	1,47	1,54	1,41
0,350	0,1813	0,750	0,752	1,70	0,991	— 0,130	1,42	1,48	1,37
0,375	0,1988	0,733	0,732	1,64	0,9975	+ 0,070	1,35	1,41	1,35

15. Kapitel.

Elektrische Theorie der Materie.

Die im Vorhergehenden zusammengefaßten Versuche und Theorien haben den Beweis geliefert, daß die wichtigste Varietät schnell fliegender Korpuskeln — die Kathodenstrahlen in einer Crookesschen Röhre, die von Radium und anderen radioaktiven Substanzen ausgesandten β-Strahlen, die Teilchen, welche von den meisten blanken Oberflächen fortgeschleudert werden, wenn sie negativ geladen sind und von ultraviolettem Licht beschienen werden, die Träger der negativen Entladung glühender Körper, und ebenso der umlaufende oder schwingende Teil eines Atoms, von dem die Emission oder Strahlung oder Ätherwellenbewegung herrührt — daß diese sämtlich von derselben Art sind und eine Trägheit rein elektromagnetischer Natur besitzen, d. h. daß sie sämtlich reine Elektronen sind ohne irgend eine Beimischung gewöhnlicher unerklärter Materie, daß sie also weiter nichts als elektrische Ladungen ohne irgendwelchen materiellen oder nichtelektrischen Kern sind.

Wir kommen also zu dem wichtigen Schluß, daß negative Elektrizität von Materie getrennt in kleinen isolierten identischen Teilen von äußerst geringer bekannter Größe, bekannter Ladung und bekannter Trägheit existieren kann, und daß die Gesetze der Mechanik, auf diese Teilchen in gegebenen elektrischen und magnetischen Feldern angewandt, uns in den Stand setzen werden, die Grunderscheinungen der elektrischen Ströme, des Magnetismus und die Entstehung des Lichtes zu erklären. Um aber chemische Vorgänge, die Einzelheiten der Strahlung, z. B. die Gruppen der Spektrallinien u. dergl., die zwischen Leitern zu beobachtenden Verschiedenheiten und die Eigenschaften magnetischer Körper zu erklären, ist es nötig, auch die Natur der *Materie* zu diskutieren

und zu untersuchen, ob sich auch ihre Trägheit und folglich ihre ganze Natur und alle ihre Eigenschaften in einfacher Weise als elektromagnetische Erscheinungen erklären lassen.

Denn wenn auch für ein Elektron bewiesen ist, daß es rein elektrische Trägheit besitzt, so ist dasselbe noch nicht für ein Atom bewiesen; die Konstitution des Atoms ist bis jetzt unbekannt und bildet nur den Gegenstand von Hypothesen. Ferner war das einzige bis jetzt beobachtete Elektron das negative; das positive hat sich bis jetzt der Beobachtung in isoliertem Zustand entzogen, da man es niemals angetroffen hat, ohne daß es mit einer Masse verbunden war, die in Größe und Gewicht einem Atom vergleichbar war. Es ist möglich, daß es nicht getrennt vom materiellen Atom existieren kann, aber in diesem Falle ist es kaum richtig, von ihm als einem Elektron zu sprechen; es mag sein, daß eine unteilbare positive Ladung selbst die Masse eines materiellen Atoms bildet; jedenfalls muß seine Natur erforscht werden, und es sind auch viele Versuche in dieser Richtung gemacht worden; unter den neueren sind namentlich die Versuche von Prof. Wien und anderen über die „Kanalstrahlen" hervorzuheben. Nach Larmor *muß* die positive Elektrizität das Spiegelbild der negativen sein und die Versuchsresultate müssen so interpretiert werden, daß sie sich diesem theoretischen Schluß anpassen. Die Beziehungen der positiven Elektrizität bilden gegenwärtig das wichtigste ungelöste Problem der Physik, und solange sie nicht aufgeklärt sind, ist ein weiterer Fortschritt in der Erkenntnis der Konstitution des Atoms unmöglich.

Der einzige Teil eines Atoms, der wirklich analysiert und sozusagen verstanden worden ist, ist der winzige aber sehr wesentliche Bruchteil seiner Masse, welcher ihm eine elektrische Ladung, folglich chemische Affinität und Strahlungsvermögen erteilt; und wenn wir fragen, woraus der ganze Rest des Atoms besteht, so ist alles, was wir sagen können, das, daß die spezifische Struktur von der Natur des betreffenden Elementes abhängen muß. Wenn wir jedoch das einfachste bekannte Atom, nämlich das Wasserstoffatom betrachten, so können wir etwa die folgenden Hypothesen aufstellen:

1. Die Hauptmasse des Atoms kann aus gewöhnlicher Materie (gleichviel was ihre eigentliche Natur sein mag) bestehen,

die mit einer hinreichenden Menge positiver Elektrizität (was sie auch sein mag) verbunden ist, um die Ladung zu neutralisieren, welche dem Elektron oder den Elektronen angehört, die ohne Zweifel in Verbindung mit jedem Atom existieren.

2. Oder die Masse des Atoms kann aus einen Aggregat von abwechselnd positiven und negativen Elektronen bestehen, die sich durch ihre gegenseitigen Anziehungen zusammenhalten, entweder in einem Zustand komplizierter Orbitalbewegung oder in einer statischen geometrischen Konfiguration, die durch irgend einen Zusammenhang konstant gehalten wird.

3. Oder die Masse des Atoms kann aus einer unteilbaren Einheit positiver Elektrizität bestehen, die eine wahrscheinlich kugelförmige Masse oder „Gallerte" bildet, in welcher eine elektrisch äquivalente Anzahl von Punktelektronen zerstreut sind; diese Elektronen sind vermutlich in Ringen nach Art von Alfred Mayers schwimmenden Magnetnadeln angeordnet, und bewegen sich in geschlossenen Bahnen um den Mittelpunkt der Kugel, indem auf sie eine Kraft wirkt, die nach dem Mittelpunkt gerichtet und der Entfernung von demselben direkt proportional ist.

Diese Hypothese hat trotz ihrer Schwächen hinsichtlich der Natur der positiven Einheit viel Anziehendes; sie erklärt eine konstante Umlaufszeit; sie kann das Vorkommen sichtbarer Strahlung durch Störungen der Bahn erklären, die durch Zusammenstöße verursacht werden; und sie ermöglicht, wie J. J. Thomson gezeigt hat, eine rationelle elektrische Theorie für Mendelejeffs Reihe der chemischen Elemente und einige ihrer chemischen, namentlich ihrer elektrochemischen Eigenschaften sowie einiger Eigentümlichkeiten ihrer Spektra. Sie erklärt ferner in durchaus natürlicher und ungekünstelter Weise die allmähliche Degradation der Atomenergie durch langsame unkompensierte und unmerkliche Strahlung, die hierdurch bedingte Unbeständigkeit und die gelegentlich eintretende explosionsartige Umwandlung eines Elementes in ein anderes oder in andere, wie man sie bei den Erscheinungen der Radioaktivität beobachtet. Sie gibt eine rationelle, wenn auch nur vorläufige Erklärung der Entwickelung aller Materie, für die jetzt manche bekannte Tatsachen sprechen; und sie erklärt in kinetischer Weise den ungeheueren Energievorrat, der in den Atomen aufgespeichert ist. Aber sie ist trotzdem weit

davon entfernt, eine definitiv angenommene Theorie zu sein, und über den Rest des Atoms kann man noch eine andere Annahme machen.

4. Diese Annahme besteht darin, daß das Atom aus einem innigen Gemisch positiver und negativer Elektrizität besteht, die zusammen eine homogene Masse bilden, nicht in Einheiten teilbar sind und durch äußere Kräfte nicht beeinflußt werden; inmitten dieser Masse können sich ein oder mehrere isolierte und individualisierte Elektronen bewegen und die Entfaltung der äußeren Aktivität bewirken, welche dem Atom seine beobachteten Eigenschaften verleiht.

5. Nach einer fünften Ansicht über das Atom besteht dieses aus einer „Zentralsonne" äußerst konzentrierter positiver Elektrizität, um die sich innerhalb ihres Attraktionsbereiches eine große Anzahl von Elektronen, ähnlich wie Asteroiden in astronomischen Bahnen bewegen. Dies würde zu einer Kraft führen, die das Gesetz vom umgekehrten Quadrat befolgt, und folglich zu Umlaufszeiten, die von der Entfernung abhängig sind; zu Gunsten einer solchen Annahme läßt sich aber keine einzige zuverlässige Beobachtung geltend machen.

Leider sind aber alle diese Annahmen sehr unbestimmt, ausgenommen die dritte, welche die positive Elektrizität als eine unteilbare Einheit vollkommen widerstandslosen gleichförmigen Materials (obgleich „Material" nicht das richtige Wort ist) von der Form einer Kugel und der Größe eines Atoms betrachtet, in welcher sich ein bestimmtes geometrisches System von Elektronen mit bekannter Frequenz in einzelnen Gruppen oder Ringen bewegen. Auch diese Annahme ist noch mit einer gewissen Unbestimmtheit behaftet und wird es bleiben, solange wir wenig oder gar nichts über die innere Natur der positiven Elektrizität wissen; aber abgesehen von diesem Mangel ist diese Hypthese bestimmt genug, und sie gestattet in beträchtlichem Umfang die Anwendung mechanischer Gesetze und Berechnungen zur Aufklärung der Erscheinungen, die ein solches „Modell" oder hypothetisches System zeigen würde. Und wenn die so berechneten Erscheinungen mit den Tatsachen in Einklang stehen, so würde dies zu Gunsten der hypothetischen Grundlage der Berechnung sprechen; allerdings würde sie wahrscheinlich bei weiteren Ent-

deckungen im Lichte der zunehmenden Erfahrung etwas umgestaltet werden müssen.

Diese Theorie über die Natur der Atome ist jedenfalls, ganz abgesehen von ihrem Wert, die einzige, welche bis zu einem gewissen Grade ausgearbeitet worden ist; und wenn sie auch gegenwärtig noch sehr unvollkommen ist, verdient sie jedenfalls wegen des Interesses, welches sie an und für sich bietet, beachtet zu werden. Sie ist von Professor J. J. Thomson im *Philosophical Magazine* vom Dezember 1903 und März 1904 entwickelt und in ihren Hauptzügen in den „Silliman Lectures" dargestellt worden, die unter dem Titel *Electricity and Matter* in Buchform erschienen sind.

Wäre der Gegenstand weniger hypothetisch, so würde er hier etwas eingehender behandelt werden, aber in einer ganz neuen Abhandlung ist er von dem genannten großen Physiker in einen Zustand äußerster Ungewißheit versetzt worden. Er gibt nämlich im *Philosophical Magazine* vom Juni 1906 Gründe, und zwar, wie es scheint, berechtigte Gründe an, welche für die Annahme sprechen, daß in einem Wasserstoffatom nur *ein* Elektron enthalten ist, und daß alle anderen Elemente eine ihrem Atomgewicht entsprechende Anzahl von Elektronen enthalten, wenn das Atomgewicht für H = 1 berechnet wird (siehe Anhang L). Dies ist ein außergewöhnliches und unerwartetes, ja auf den ersten Blick unwahrscheinliches Resultat, da die Annahme des Atomgewichtes des Wasserstoffs als Einheit als ein Übereinkommen angesehen worden ist, welches man lediglich aus Zweckmäßigkeitsrücksichten gemacht hatte. Ich glaube nicht, daß irgend jemand auch nur provisorisch angenommen hat, daß diese Annahme eine physikalische und rationale Grundlage habe. Wir kommen im 17. und 19. Kapital auf diese Frage zurück.

Bei diesem Zustand von Ungewißheit müssen wir den Gegenstand für jetzt verlassen; aber wir können dazu übergehen wenigstens anzudeuten, wie einige Eigenschaften der Materie vorausgesehen oder erklärt werden können, wenn man eine elektrische Konstitution der Materie annimmt, nach welcher diese aus einer großen Anzahl positiver und negativer elektrischer Ladungen besteht, ohne daß auf die Art ihres Zusammenhanges und ihrer Verteilung Rücksicht genommen zu werden braucht.

16. Kapitel.

Elektrische Theorie der Materie (Fortsetzung).

Natur der Kohäsion.

Wir wollen jetzt einige Konsequenzen der Annahme verfolgen, daß alle materiellen Atome aus denselben Fundamentaleinheiten aufgebaut sind und aus Aggregaten einer bestimmten Anzahl verschiedenartig gruppierter positiver und negativer Ladungen bestehen — die wir für den vorliegenden Zweck Elektronen nennen wollen, trotzdem einige positiv sind — die in kinetischen Mustern angeordnet sind und die infolge der Heftigkeit ihrer Orbitalbewegung isoliert bleiben.

Anfangs ist es nicht leicht, sich etwas anderes vorzustellen, als daß die Elektronen in regelmäßigen Mustern statisch angeordnet sind. Dies kann man sich leicht auf Grund der Hypothese Nr. 3 des letzten Kapitels vorstellen; denn wenn sie auch im freien Raum unbeständig sein oder sich zerstreuen würden, so lassen sich doch ihre möglichen Gruppierungen in einem positiven Lösungsmittel leicht berechnen. Sie können z. B. in triangularer oder quadratischer oder hexagonaler Weise angeordnet sein; andere ähnliche dreidimensionale Möglichkeiten sind aus der Kristallographie bekannt. Man vergleiche z. B. William Barlow, *British Assoc. Report*, 1896, p. 731, auch Lord Kelvin, *Phil. Mag.*, März 1902 und a. a. O.

Über chemische und Molekularkräfte.

Es ist seit langer Zeit bekannt, daß die Kraft der chemischen Affinität elektrischer Natur ist. Diese Ansicht wurde zuerst von Berzelius ausgesprochen und auch von Davy und später von Faraday vertreten. Die gewöhnliche elektrische Anziehung zwischen ge-

ladenen Körpern kann als molare chemische Wirkung bezeichnet werden; nur findet gewöhnlich keine Vereinigung statt, weil die entgegengesetzten Ladungen sich durch einen Funken gegenseitig neutralisieren und infolgedessen bei einer gewissen Annäherung die Anziehung aufhört. Diese Entladung und das Aufhören der Anziehung scheint zwischen Atomen nicht stattzufinden. Die Potentialdifferenz zwischen ihnen ist zu niedrig, um den gegenseitigen Austausch oder die Neutralisation zu gestatten und es findet eine dauernde Vereinigung statt. [1])

Wirkliche chemische Anziehung findet zwischen zwei Atomen statt, von denen jedes ein überschüssiges oder mehr als ein überschüssiges nicht neutralisiertes Elektron von gegebenem Vorzeichen enthält. Ein solches Atom hat also ein Kraftzentrum, durch welches es sich an ein anderes Atom anheften und mit ihm eine chemische Verbindung bilden kann. Wahrscheinlich bildet eine negative Ladung einen Überschuß und eine positive Ladung ein Defizit, und wenn eine Vereinigung stattfindet, so gleicht der Ladungsüberschuß des einen Atoms das Defizit des anderen aus und es entsteht ein vollständiges oder neutrales Molekül.

Eine Vereinigung dieser Art ist aber, wie es scheint, niemals so stark und dauernd wie die Vereinigung der Elektronen im Atom selbst; das Molekül zerfällt unter dem Einfluß zersetzender Wirkungen wieder leicht in die Bestandteile, aus denen es entstanden ist, und es ist, wie es scheint, unfähig in anderer Weise in neue Substanzen zu zerfallen, ausgenommen bei organischen Verbindungen, bei denen ein komplexes Molekül in verschiedener Weise zerfallen kann; man macht hiervon Gebrauch zur Erzeugung neuer Verbindungen, z. B.

$$C H_3 . C H_3 = C_2 H_5 . H.$$

Wahrscheinlich ist derselbe Vorgang bei einfachen Körpern *möglich,* aber die sogenannten „Elemente“ bilden eine besonders stabile Gruppe, deren Bestandteile sich nur teilweise zu isomeren oder allotropischen Formen vereinigt haben und bis jetzt noch nicht von einander getrennt worden sind.

Wenn sich zwei entgegengesetzt geladene Atome chemisch vereinigen, so findet keine elektrische Entladung zwischen ihnen

1) Siehe Lodge, *Brit. Ass. Report.*, 1885, p. 744, 5.

statt; jedes der beiden Atome behält seine eigne Ladung und aus diesem Grunde haften sie aneinander. Wenn sie voneinander getrennt waren, so ist jedes ein Ion und besitzt seine eigne Ladung.

Es ist möglich, ein Aggregat von neutralen Molekülen mit einem Überschuß oder einem Defizit von einem oder mehreren Elektronen durch die gewöhnlichen Elektrisierungsmethoden, z. B. Reibung zu laden; aber diese überzähligen Elektronen sind lose gebunden und können durch die erschütternde Wirkung ultravioletten Lichtes und durch verschiedene andere Mittel abgeschüttelt werden. Selbst beim Auffallen und Zerstäuben von Wasser werden einige frei und können ein Elektroskop beeinflussen, trotzdem die Flüssigkeit vorher nicht geladen war[1]); diese und andere Tatsachen machen es wahrscheinlich, daß die Wassereinheit ein Aggregat von Molekülen ist. Und bei den Atomen von hohem Gewicht erreichen sie anscheinend automatisch einen Zustand von Unbeständigkeit und ordnen sie sich von neuem in einer solchen Weise an, daß sie spontan ein oder mehrere Elektronen abwerfen, die dann tangential mit der Orbitalgeschwindigkeit, welche sie gerade haben, fortfliegen und zum Teil die neuerdings entdeckten und als *Radioaktivität* bezeichneten Erscheinungen hervorrufen. Aber anstatt anzunehmen, daß die Heftigkeit, mit der sie fortgeschleudert werden, von einer Geschwindigkeit herrührt, die sie vorher hatten, kann man auch annehmen, daß sie durch eine innere statische Kraft fortgetrieben werden, so daß die Energie, welche sie vorher besaßen, potentielle war; dies ist die Form der Hypothese, die von Lord Kelvin bevorzugt wird. Siehe *Phil. Mag.*, März, 1902.

Molekularkräfte. Kohäsion.

Es gibt aber noch eine andere Art von Adhäsion oder Kohäsion der Moleküle, die nicht chemischer, sondern, wie man zu sagen pflegt, molekularer Natur ist. Diese findet zwischen Atomen statt, die keine Ionenladungen oder Extraladungen besitzen, sondern die vollkommen neutral sind, indem sie aus Paaren von

1) Lenard über Elektrisierung bei Wasserfällen. Siehe auch 7. Kap. über Ionisierung.

je einem positiven und negativen Elektron zusammengesetzt sind. In mäßiger Entfernung ist die Anziehungskraft zwischen solchen Elektronenpaaren fast gleich Null, aber auf sehr kleine Entfernungen kann sie sehr groß sein und schließlich so groß werden, daß sie von chemischer Vereinigung nicht zu unterscheiden ist; nur ist der Zusammenhang ein schwacher an einer großen Anzahl von Punkten und nicht ein intensiver an einem einzigen Punkt.

Man betrachte die äußere Oberfläche eines Atoms, welches aus einer regelmäßigen Gruppe von abwechselnd positiven und negativen Elektronen besteht. Seine Aequipotentialflächen sind gekräuselte oder runzelige Blätter, die in geringer Entfernung fast glatt sind; aber die Vertiefungen nehmen schnell zu und die

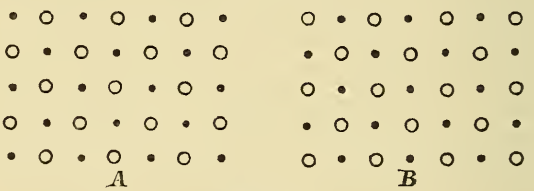


Fig. 20.

Gewöhnliche Kohäsion zwischen zwei neutralen Atomen A und B; es wird angenommen, daß jedes Atom aus abwechselnd positiven und negativen Elektronen besteht, die sich gegenseitig durch Restaffinität anziehen. Diese rührt daher, das einige von den Kraftlinien von einem Atom zum anderen laufen und die Atome zusammenhalten. Die größte zulässige Spannung hängt vom Verhältnis des Abstandes der Elektronen in jedem Atom zum Abstand der Atome selbst ab.

Fläche bekommt das Ansehen einer Matratze, wenn eine Entfernung erreicht wird, die etwas kleiner als der Abstand der Moleküle ist und sich dem Abstand der Elektronen innerhalb der Moleküle nähert.

Zwei solche Atome werden daher bestrebt sein, eine solche Lage einzunehmen, daß ihre Aequipotentialflächen sich gegenseitig anpassen, d. h. daß die Erhöhungen der einen in die Vertiefungen der anderen kommen; dies ist der Zustand, auf den die Tatsachen der Kohäsion hinweisen; zur Erläuterung soll Fig. 20 dienen.

Das eigentliche Kraftgesetz zu ermitteln, würde schwierig sein, und es müßten zu viele Annahmen über die geometrische

Anordnung der Elektronen in den benachbarten Atomen gemacht werden; es könnte nur approximativ sein, da wir wahrscheinlich, wenigstens zunächst, eine statische Verteilung annehmen müßten. Trotzdem kann der Versuch lehrreich sein und er eignet sich in entwickelter Form vielleicht für eine Adamspreis-Abhandlung.

Jedenfalls würde aber das Ergebnis eine Kraft sein, die für kleine Entfernungen sehr schnell zunimmt und groß wird, für jede wahrnehmbare Entfernung aber gleich Null ist.

Eine Theorie der Kohäsion kann nicht gegeben werden, bevor die Struktur eines Atoms besser bekannt ist, aber sie wird sich höchst wahrscheinlich in der angedeuteten Weise entwickeln.

Die Molekularkräfte sind nach dieser Auffassung ebenso wie die chemischen Kräfte elektrischer Natur, aber sie wirken zwischen chemisch gesättigten Molekülen und sie entspringen aus der gegenseitigen Einwirkung der Elektronenpaare auf molekulare Entfernungen. Man kann sagen, daß sie ein Resultat der „Restaffinität“ sind.[1])

Ionen können sich nicht in dieser Weise verbinden, denn wenn sie entgegengesetzt geladen wären, so würde ihre Vereinigung eine chemische sein, und wenn sie gleichartig geladen wären, so würden sie sich einander heftig abstoßen. Wenn aber Ionen an einer Metallelektrode ankommen oder wenn es ihnen in anderer Weise ermöglicht wird, ihre freien Ladungen abzugeben, so hören sie auf Ionen zu sein; und dann können sich die entladenen Atome miteinander zu Molekülen verbinden.

Ein Ion kann natürlich mehr als ein freies Elektron haben und ein zweiwertiges oder dreiwertiges Radikal bilden; und es ist jedenfalls lehrreich, daß die Art und Weise, wie eine neutrale Gruppe ein überschüssiges fremdes Elektron aufnehmen und durch plötzliche Neuanordnung abgeben kann, an die Neuanordnung der Häutchen in einem Schaum erinnert, wenn ein Bläschen zerplatzt.

Der Einfluß der elektrischen Polarisation auf eine solche neutrale Gruppe von Elektronen ist bemerkenswert. Die Wirkung eines in der Nähe befindlichen geladenen Körpers besteht darin, daß er sowohl das Gleichgewicht als auch die Gruppierung im Atom mehr oder weniger stört; er wird bewirken, daß auf der

---

1) Siehe Lodge in *Nature*, 1904, vol. 70, p. 176.

einen Seite die negativen und auf der anderen Seite die positiven Elektronen etwas hervortreten. In Fig. 21 sind zwei verschiedene aber sehr vollständige Arten von Polarisation dargestellt.

Wenn zwei Moleküle sich außerhalb ihrer gegenseitigen Wirkungssphäre befänden und wenn die benachbarten Oberflächen — etwa durch Zufuhr von Elektrizität von außen — entgegengesetzt elektrisiert werden könnten, so würden die Kohäsionskräfte momentan durch etwas wie chemische Affinität verstärkt werden, und die Kohäsion würde auf ultramolekulare Entfernungen wirksam sein. Dies scheint es zu sein, was in einem „Kohärer" vor sich geht. Die entgegengesetzten Ladungen können nicht zwischen zwei benachbarten Metalloberflächen elektrostatisch *aufrecht* erhalten werden, aber sie können durch einen plötzlichen

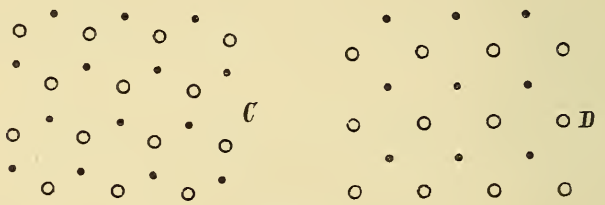


Fig. 21.

Zwei polarisierte Atome zur Veranschaulichung elektrisch verstärkter Kohäsion.

Stoß oder eine disruptive Endladung oder einen elektrischen Impuls momentan mitgeteilt werden; dies sind eben die Wirkungen, durch welche die Kohäsion befördert wird.

Von den beiden Figuren 20 und 21 stellt die erstere ein Atompaar mit abwechselnd positiven und negativen Elektronen in quadratischer Anordnung vor; die Atome befinden sich gegenseitig in ihrer Wirkungsphäre und ziehen sich also durch molekulare oder nichtchemische Kräfte an. Sie haben sich in eine Kohäsionsstellung angeordnet; aber eine vertikale Verschiebung um den halben Abstand der Elektronen würde sie voneinander trennen. Ein Winkel, welcher durch die Hälfte des Elektronenabstandes dividiert durch den Molekularabstand dargestellt wird, ist also das Maß für die größte Deformation, welche eine Substanz erleiden kann.

Fig. 21 zeigt ein Paar von Atomen, die beide elektrisch polarisiert sind, etwa dadurch, daß ein positiv geladener Stab über sie gehalten wird. Die Bestandteile von C sind der Abwechselung halber in hexagonaler Anordnung gezeichnet, die in manchen Fällen auch durch einen seitlichen Druck bewirkt werden kann; die Bestandteile von D sind in diagonal quadratischer Anordnung gezeichnet, was eine heftige elektrische Polarisation zur Folge hat. Unter allen Umständen werden polarisierte Atome wie C und D durch viel stärkere Kräfte zusammengehalten als die Kraft der gewöhnlichen Kohäsion auf diese Entfernung. Sie repräsentieren nebeneinander liegende Atome eines momentan polarisierten Kohärers.

Man braucht nicht anzunehmen, daß in einem polarisierten Atom die Elektronen in einem solchen Grade verschoben sind, wie es die Figur andeutet. Sie brauchen es uur in fast unmerklicher Weise zu sein, um diesen Effekt chemischer Kohäsion hervorzurufen. Die Polarisation besteht eben darin, daß sie die gewöhnliche Molekularkraft oder Kohäsion in anfangende aber wirkliche chemische Affinität verwandelt; beide Arten von Kräften sind nach obiger Hypothese elektrisch erklärbar.

17. Kapitel.

Weitere Betrachtungen über die Struktur des Atoms.

Die bereits im 15. Kapitel unter Nr. 3 erwähnte Hypothese, daß das Atom aus einer kugelförmigen Masse positiver Elektrizität besteht, in die winzige negative Elektronen eingelagert sind — die entweder in Ruhe sind oder um Gleichgewichtslagen hin- und herschwingen oder sich in regelmäßigen geschlossenen Bahnen bewegen — ist natürlich nicht frei von Schwierigkeiten; da sie aber viele beobachtete Tatsachen erklärt, ist ein Versuch, diese Schwierigkeiten zu vermindern, gerechtfertigt, und es ist nicht aussichtslos, daß es schließlich gelingen wird, sie zu überwinden.

Ein Einwand, welcher leicht erhoben werden kann, ist die Frage, wie eine Masse positiver Elektrizität gegen die gegenseitige Abstoßung ihrer Teile zusammengehalten werden kann. Diese Schwierigkeit macht sich bei der positiven Elektrizität in höherem Grade fühlbar als bei der negativen, da nach der Hypothese die positive Ladung eine merkliche Größe, nämlich die Größe eines Atoms hat, während die negative Ladung oder das Elektron verschwindend klein ist. Aber so klein auch ein Elektron ist, muß doch angenommen werden, daß es Teile hat, und ebensogut wie man annehmen kann, daß sich die Teile der positiven Einheit gegenseitig abstoßen, kann man auch annehmen, daß sich die Teile der negativen Einheit gegenseitig abstoßen. Man kann also mit demselben Recht fragen, wie die Teile eines Elektrons zusammengehalten werden. Aber diese Frage wird, wie es scheint, von niemanden aufgeworfen, und ich sehe keinen Grund, weshalb sie aufgeworfen werden sollte, denn es ist nicht bewiesen, daß sich die Teile eines Elektrons wirklich gegenseitig abstoßen, ja es ist bis jetzt nicht einmal bewiesen, daß es über-

haupt Teile hat. Wir wissen weiter nichts als daß verschiedene Elektronen sich gegenseitig abstoßen und von positiven Ladungen angezogen werden, aber wir wissen nicht, daß sich die Teile eines Elektrons gegenseitig abstoßen; von den Teilen eines Elektrons wissen wir überhaupt nichts. Das Kraftfeld oder die Kraftlinien, durch welche die Aktivität eines Elektrons repräsentiert wird, können ganz außerhalb desselben sein und brauchen keineswegs in das Innere einzudringen; es kann für alle elektrischen Zwecke eine unteilbare Einheit sein.

Wenn wir aber dies alles für eine negative Ladung gelten lassen, warum sollen wir es nicht ebensogut für eine positive Ladung gelten lassen? Warum sollen sich die Teile einer positiven Einheit gegenseitig abstoßen? Man darf nicht sagen, daß die Einheit voluminöser ist, wenn man sich nicht das Elektron als einen geometrischen Punkt vorstellen will; die Annahme der Existenz von Teilen ist also in dem einen Falle ebenso berechtigt wie im anderen. Was wir haben müssen, ist eine bestimmte Vorstellung von der Natur der positiven Ladung, aber diese fehlt uns leider; Larmor hält allerdings eine verwickelte Struktur *(entanglement)* für durchaus möglich und natürlich; und jedes beliebige Argument gegen die Existenz derselben, welches sich auf die abstoßende Wirkung ihrer Teile stützt, entbehrt, wie es scheint, der Beweiskraft.

Eine andere Annahme, welche man machen kann, ist die, daß die Hauptmasse des Atoms, in welche die Elektronen eingebettet sind, nicht ausschließlich aus positiver Elektrizität, sondern aus einem innigen Gemisch oder einer Verbindung von positiver und negativer Elektrizität besteht, die untrennbar miteinander verbunden sind und sich gegen äußere Kräfte ähnlich verhalten wie Sauerstoff und Wasserstoff, die in einer Gallone Wasser innig miteinander verbunden sind; in diesem Wasser können leicht einige überzählige Atome Sauerstoff gelöst sein, so daß sie sich in einem verhältnismäßig freien Zustand befinden, und nicht zu den fest gebundenen Sauerstoffbestandteilen gehören, und ebenso können einige überschüssige Elektronen in der Gesamtmasse eines Atoms vorhanden sein.

Dies ist von den im 15. Kapitel zusammengestellten Hypothesen, zwischen denen wir die Wahl haben, die vierte, und

die neuesten von Thomson erzielten Resultate, welche ebenfalls in dem genannten Kapitel erwähnt wurden, sind geeignet, diese Hypothese zu stützen.

Wenn also Kraftlinien zwischen dem positiven und dem negativen Fluidum innerhalb des Atoms angenommen werden, so haben sie einen durchaus internen Charakter, und nur diejenigen, welche zu einigen freien überschüssigen Ladungen gehören, würden austreten und Ionenaktivität erzeugen; die inneren Linien würden ausschließlich dazu dienen, das Atom zusammenzuhalten und sie würden keinen Einfluß auf benachbarte Atome ausüben, selbst nicht einen molekularen Einfluß oder einen Resteinfluß. Die Hauptmasse des Atoms würde in diesem Falle einem Blätterkondensator vergleichbar sein, der einer Entladung oder Zersetzung unfähig ist, ausgenommen ein wirkliches Zerfallen, welches gelegentlich Radioaktivität begleiten oder hervorrufen kann.

18. Kapitel.

Andere Konsequenzen der Elektronentheorie.

Radioaktivität.

Wenn viele Atome einer Substanz mit Elektronen verbunden sind, und wenn diese sich in geschlossenen Bahnen bewegen, so bietet sich naturgemäß die Frage, wie es möglich ist, daß diese Substanzen nicht ununterbrochen Wellen aussenden und ihre Energie ausstrahlen. Denn, wie wir im 10. Kapitel gesehen haben, bilden elektrische Ladungen, die eine umlaufende oder schwingende Bewegung ausführen, Radiatoren oder Ausgangspunkte von Strahlungen, und sie müssen durch die Strahlung ihre kinetische Energie zerstreuen und entweder nach und nach zur Ruhe kommen oder eine andere Verwandlung bewirken. Glücklicherweise sind durch die glänzenden Untersuchungen von Becquerel, Curie und anderen gewisse Substanzen aufgefunden worden, in denen die Strahlungsenergie eine sehr merkliche Größe erreicht; und diese Strahlung kann, wie sich gezeigt hat, von verschiedener Art sein:

1. sie kann aus Wellen oder Pulsen wie die Röntgenstrahlen bestehen; dies sind die sogenannten γ-Strahlen.

2. sie kann aus Strahlen ähnlich wie die Kathodenstrahlen, d. h. aus fortgeschleuderten Elektronen bestehen; dies sind die sogenannten β-Strahlen.

3. sie können aus positiv geladenen Ionen oder Atomen oder Halbatomen von etwas wie Helium bestehen, die ebenfalls mit großer Heftigkeit fortgeschleudert werden; dies sind die sogenannten α-Strahlen.

4. Infolge aller dieser Strahlungen strömen von dem Rest der Substanz Teilchen aus, die nicht mit Elektrizität geladen sind.

Diese gasförmige Emanation, welche einem Geruche vergleichbar von der Substanz ausgeht, besitzt selbst ein hohes Strahlungsvermögen und sie kann sich an benachbarte Substanzen anheften oder auf ihnen einen Niederschlag bilden, infolgedessen auch diese Substanzen ein vorübergehendes Strahlungsvermögen bekommen; dieser Niederschlag wurde früher als induzierte oder erregte Aktivität bezeichnet. [1])

Die Substanzen, welche dieses Strahlungsvermögen in bemerkenswertem Grade besitzen, sind Substanzen mit sehr hohem Atomgewicht, und ihr Strahlungsvermögen wird wahrscheinlich durch eine innere Erschütterung verursacht, die heftig genug ist, um fortwährend Teilchen oder Fragmente fortzuschleudern und durch den Stoß der Expulsion einige schwache aber äußerst durchdringende Röntgenstrahlen zu erzeugen.

Daß wirkliche Zusammenstöße, wenn sie mit hinreichender Plötzlichkeit stattfinden, Strahlung zur Folge haben müssen, ist leicht zu verstehen; aber wir können nicht umhin zu fragen, warum gibt nicht auch in einer Substanz, die sich nicht in einem Zustand heftiger Wärmeerregung befindet und die nicht besonders schwere Atome besitzt, die ruhige Orbitalbewegung der Elektronen um die Atome Veranlassung zu einem merklichen Betrage von Strahlung und Verlust von Energie? Eine Antwort, welche sich auf diese Frage geben läßt, ist die folgende.

Die Radiatoren sind nicht isoliert oder unabhängig, und die Oberflächenstrahlung wird durch Schichten in größerer Tiefe der Substanz unterhalten. Ferner sind die Radiatoren so dicht bei einander, daß sie sich innerhalb der ersten viertel Wellenlänge

---

1) Aus der Literatur sind hervorzuheben die Abhandlungen des Entdeckers der spontanen Radioaktivität, H. Becquerel, in *Comptes Rendus,* 1896 und 1897; ferner Rutherford, *Phil. Mag.,* Januar 1899 und 1900, wo auch über quantitative Bestimmungen berichtet wird; auch *Phil. Mag.,* Juli und November, 1902. Andere wichtige Abhandlungen sind die folgenden: Herr und Frau Curie, *Comptes Rendus,* November 1899; R. J. Strutt, *Phil. Trans.* A. 1901, vol. 196, p. 525; Sir W. Crookes, *Proc. Roy. Soc.,* vol. 66, p. 405 (1900), vol. 69, p. 413 (1902, „Electrical Evaporation", 1891, *Proc. Roy. Soc.,* vol. 50, p. 88; eine zweckmäßige Zusammenstellung der Literatur findet sich in dem ausgezeichneten Werke von Professor Rutherford.

Frau Curies Promotionsarbeit über die Radioaktivität ist eine meisterhafte Leistung.

in allen möglichen Phasen befinden, und diese Länge umfaßt eine große Menge derselben; die äußere Wirkung einer großen Menge von Radiatoren ist aber geringer als die eines einzigen, da sie interferieren wie die Zinken einer Stimmgabel oder zwei benachbarte Orgelpfeifen oder die Schwingungen einer Saite. Man vergleiche Larmor, *Ether and Matter,* S. 232; nach seiner Ansicht erklärt sich die Sache dadurch, daß die Vektorsumme der Beschleunigungen gleich Null ist.

Man darf nämlich nicht vergessen, daß auch bei niedriger Temperatur von allen Substanzen Strahlung ausgeht; daß die Energie erhalten wird und Konstanz der Temperatur besteht, einfach weil der Verlust gleich dem Gewinn ist, weil die Strahlung durch Absorption ausgeglichen wird, und nicht weil die Strahlung aufhört; und daß, um den Betrag der Strahlung zu schätzen, man sich den Körper in einem Raum von der Temperatur des absoluten Nullpunktes denken müßte; dann würde seine Energie ohne Zweifel schnell verloren gehen und zerstreut werden. Aber dies gilt nur für gewöhnliche Strahlung, während es sich im vorliegenden Falle um die als Radioaktivität bezeichnete außergewöhnliche Art von Strahlung handelt.

Wenn die Strahlung auf Kosten der inneren Energie des Atoms vor sich geht, wie es sein muß, wenn das Atom umlaufende Elektronen enthält — noch mehr, wenn es nach der elektrischen Theorie der Materie ganz aus elektrischen Ladungen besteht, so muß weiter gefragt werden, warum sind nicht alle Atome temporär und unbeständig? Warum sind sie nicht sämtlich inneren Katastrophen unterworfen, die man mit Erdbeben oder vulkanischen Ausbrüchen vergleichen könnte? Warum zeigen sie nicht sämtlich die Erscheinungen der Radioaktivität?

Das Gebiet der Radioaktivität ist ein umfangreiches, und ich habe nicht die Absicht, hier ausführlich auf die betreffenden Erscheinungen einzugehen. Es mag nur hervorgehoben werden, daß es weniger die Erklärung der Tatsache selbst ist, was Schwierigkeiten bietet, als vielmehr die Beantwortung der Frage, warum sie nicht allgemeiner bekannt ist.

Was jedoch die auffallendste und interessanteste Erscheinung — die ungemein starke photographische und elektrische Radioaktivität gewisser seltener Substanzen — betrifft, so wurde bereits

darauf hingewiesen, daß sie zum größten Teil nicht auf der Emission eigentlicher Strahlung — in Form von Pulsen oder X-Strahlen oder in irgend einer anderen Form — besteht, sondern im Fortschleudern von Teilchen, zuweilen negativ geladenen Teilchen oder Elektronen, zuweilen positiven Ionen. Und wenn diese fortgeschleuderten Teilchen eine photographische Platte treffen, so erzeugen sie, wie es scheint, durch die Erschütterung elektrische Wellen, und diese wirken auf das Silbersalz ein. Die von Dr. W. H. Russell beobachtete schwache photographische Wirkung gewöhnlicher Substanzen ließ vermuten, daß diese Eigenschaft nicht auf Körper mit hohem Atomgewicht, wie Uran, Radium, Polonium usw. beschränkt ist, wie Becquerel, sowie Herr und Frau Curie beobachtet hatten. Diese Substanzen besitzen die Eigenschaft in außergewöhnlich hohem Grade, aber Dr. Russell hat sie, wie es scheint, auf eine rein chemische Wirkung des Wasserstoffdioxyds zurückgeführt. Auch die Blätter wachsender Pflanzen üben, wie er vor kurzem nachgewiesen hat, eine spontane photographische Wirkung derselben Art aus.

Alle diese Erscheinungen, sowie auch die schon vor langer Zeit von Guthrie (siehe *Phil. Trans.* [4], 46, S. 273) entdeckte Erscheinung des Ladungsverlustes heißer Körper[1]) verdienen eingehend beobachtet und bearbeitet zu werden.

Crookes entdeckte, daß die α-Strahlen oder die von Radium, Polonium und anderen stark radioaktiven Substanzen fortgeschleuderten Teilchen durch ihr Aufprallen auf einen Zinksulfidschirm Lichtblitze erzeugen, die bei schwacher Vergrößerung sichtbar sind; und es spricht alles dafür, daß viele von den aufprallenden Atomen eine hinreichende Geschwindigkeit haben, um für sich allein durch ihre Einwirkung auf die kristallinische Verbindung einen Blitz zu erzeugen, eine Erscheinung, die durch ein kleines Taschenінstrument, das sogenannte „Spinthariskop", in weiteren Kreisen bekannt geworden ist. Wenn wir bedenken, mit welcher Geschwindigkeit diese Teilchen fortgeschleudert werden, so ist eine solche Annahme nicht überraschend, obwohl es etwas neues

1) Siehe z. B. Strutt, über den Elektrizitätsverlust heißer Körper, *Phil. Trans.*, Juli 1902; J. J. Thomson, *Phil. Trans.* August, 1902; O. W. Richardson, *Phil. Trans.* Vol. 201, p. 516 (1903).

ist, seine Aufmerksamkeit auf einen wahrnehmbaren Effekt richten zu müssen, der durch ein einzelnes Atom hervorgebracht wird. Allein wenn man annimmt, daß diese Projektile Wasserstoffatome oder Heliumatome mit einer Masse von 10^{-24} Gramm sind, die mit einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit fliegen, so würde das Anhalten eines derselben innerhalb molekularer Dimensionen, d. h. innerhalb seiner eignen Dicke, die gewöhnlich auf 10^{-8} Zentimeter geschätzt wird, für eine verschwindend kleine Zeit die Aufwendung von 80 Pferdekräften erfordern.

Sonnenkorona, magnetische Gewitter und Nordlichter.

Ein anderes interessantes Problem ist die Erklärung verschiedener astronomischer und meteorologischer Erscheinungen durch die Elektronentheorie.

Die Theorie des Nordlichtes ist neuerdings von Arrhenius ausgearbeitet worden; aber die ganze Lehre von den Sonnenemanationen und von der Ausstoßung kleiner Teilchen durch ihr Licht und durch ihre mutmaßliche elektrische Ladung war mir seit vielen Jahren aus Unterhaltungen mit Fitz Gerald und anderen bekannt. Man sehe z. B. Larmor, *Phil. Trans.*, 1894, vol. 185, p. 813; Lodge, über Sonnenflecke, magnetische Gewitter, Kometenschweife, atmosphärische Elektrizität und Nordlichter, im *Electrician* vom 7. Dezember 1900, vol. 46, p. 250; Fitz Gerald, *Electrician*, 14. Dezember, 1900, mit Bezugnahme auf seine Rezension eines Bandes der Electrician-Series von Heaviside vom Jahr 1893 (*Electrician*, vol. 31, p. 390). Siehe auch Fitz Geralds gesammelte „Scientific Writings", 1882.

Die Erde ist in der Tat ein Schirm, welcher den Kathodenstrahlen oder vielmehr den Elektronen ausgesetzt ist, die von einem glühenden Körper, nämlich der Sonne ausgesandt werden. Die Sonne ist ohne Zweifel in hohem Grade radioaktiv, und es ist nicht unwahrscheinlich, daß das Ausströmen der Elektronen in den annähernd leeren Raum in der Umgebung die Erscheinung der Korona hervorruft. Die allmähliche Anhäufung negativer Elektrizität auf der Erde ist eine natürliche Folge dieses Elektronenbombardements, welches sich auf größere Entfernungen hin durch den Raum erstreckt, wo keine Restmaterie existiert;

und die Tatsache, daß der Schwarm fliegender Teilchen einen elektrischen Strom von ziemlicher Stärke bildet, gibt eine leichte Erklärung für eine Klasse von magnetischen Gewittern, von denen man seit langer Zeit wußte, daß sie mit den Sonnenflecken und den Nordlichtern im Zusammenhang stehen. Vielleicht dienen auch die elektrischen Kerne, wenn sie Ionen bilden, in großer Höhe Kondensationszentra für Verdichtung des atmosphärischen Wasserdampfes und üben so einen Einfluß auf die Regenbildung aus. Ferner gibt uns, wie es scheint, die Tatsache, daß sich der Wasserdampf leichter auf negativen als auf positiven Ionen verdichtet, ein Mittel, die atmosphärische Elektrizität zu erklären; denn ein Regenfall würde eine negative Ladung mit sich nach unten bringen und die oberen Regionen in bezug auf die Erde positiv geladen zurücklassen. Dies steht mit dem Vorzeichen des normalen elektrischen Kraftfeldes in der Atmosphäre in Einklang.

Diese Ideen sind neuerdings von Arrhenius eingehend bearbeitet worden; und seine Erklärung des Nordlichtes ist besonders bestimmt und interessant. Nach dieser Erklärung werden die schnell bewegten Elektronen von den magnetischen Kraftlinien der Erde aufgefangen und so geführt, daß sie von dem tropischen Sonnenschein abgelenkt und die Linien entlang in langen Spiralen nach den Polen geführt werden, wo sie in den verdünnten höheren Regionen der Atmosphäre die Erscheinungen der Vakuumröhre hervorrufen. Auch einige andere astronomische Erscheinungen sucht Arrhenius in einer Weise zu erklären, die großes Interesse bietet.

Umwandlungen von Radium usw.

Rutherford gibt die folgenden Einzelheiten über die spontanen Umwandlungen, welche das Radium erleidet, über die konstante Lebensdauer der verschiedenen Produkte — d. h. die Zeit, welche erforderlich ist, damit die Aktivität des Produktes auf die Hälfte ihres Wertes fällt — und über die Natur der Teilchen oder Strahlen, welche ausgesandt werden.

Einige von den Umwandlungen erfolgen ohne Aussendung von Strahlen und können als Übergang in eine allotropische Modifikation ohne Änderung des Atomgewichts betrachtet werden;

sobald aber ein α-Teilchen fortgeschleudert wird, muß sich das Atomgewicht ändern, vermutlich um einen Betrag, welcher dem Verlust eines Atoms Helium entspricht. Es ist zu bemerken, daß die γ-Strahlen oder Röntgenstrahlen stets die Emission eines β-Teilchens oder Elektrons begleiten und sonst nie erscheinen, ebenso daß nur bei einigen der Umwandlungen Elektronen fortgeschleudert werden. Die sogenannten „Emanationen" sind sämtlich gasförmiger Natur, während die anderen Produkte eine Art festen Niederschlag bilden. Diese aktiven Niederschläge oder „erregten Aktivitäten" können der Einwirkung gewöhnlicher chemischer Reagentien unterworfen werden; einige derselben sind bei hoher Temperatur flüchtig, andere dagegen sind nicht leicht zu verflüchtigen. Die folgende Tabelle enthält die wichtigsten

Die Substanz	hat eine Lebensdauer von	sie sendet aus	und geht über in
Uran.	(etwa) 600 Millionen Jahre.	ein α-Teilchen oder (?) Heliumatom.	Ur. X
Ur. X.	22 Tage.	β- u. γ-Strahlen.	
Thor.	24×10^9 Jahre.	ein α-Teilchen.	Th. X.
Th. X.	4 Tage.	ein α-Teilchen.	Emanation.
Emanation.	54 Sekunden.	ein α-Teilchen.	Th. A.
Th. A.	11 Stunden.	keine Strahlen.	Th. B.
Th. B.	55 Minuten.	α-, β- u. γ-Strahl.	
Aktinium.		keine Strahlen.	Akt. X.
Akt. X.	10 Tage.	ein α-Teilchen.	Emanation.
Emanation.	4 Sekunden.	ein α-Teilchen.	Akt. A.
Akt. A.	36 Minuten.	keine Strahlen.	Akt. B.
Akt. B.	2 Minuten.	α-, β- u. γ-Strahl.	
Radium.	1300 Jahre.	ein α-Teilchen.	Emanation.
Emanation.	4 Tage.	ein α-Teilchen.	Radium A.
Radium A.	3 Minuten.	ein α-Teilchen.	Radium B.
Radium B.	21 Minuten.	keine Strahlen.	Radium C.
Radium C.	28 Minuten.	α-, β- u. γ-Strahl.	Radium D.
Radium D.	40 Jahre.	keine Strahlen.	Radium E.
Radium E.	6 Tage.	β- u. γ-Strahlen.	Radium F.
Radium F.	143 Tage.	ein α-Teilchen.	vielleicht Blei.

Umwandlungen der bemerkenswerteren radioaktiven Substanzen; für weitere Einzelheiten muß auf das Buch von Rutherford verwiesen werden. Das hier als Radium F bezeichnete Produkt scheint dasselbe zu sein, welches von anderen Beobachtern Radiotellur und von dem ursprünglichen Entdecker, Frau Curie, Polonium genannt wird.

Emanationen.

Die Thoremanation und die Radiumemanation wurden von Rutherford, beziehungsweise von Dorn entdeckt, und zwar infolge einer Beobachtung von Owen über eine Unregelmäßigkeit in der ionisierenden Wirkung der Thorstrahlen. Er hatte beobachtet, daß jede dieser beiden Substanzen stärker aktiv ist, wenn man der Emanation Zeit gelassen hat sich anzusammeln, als unmittelbar nachdem sie entfernt worden ist. Die Emanation ist nämlich trotz ihrer verschwindend kleinen Menge beträchtlich stärker aktiv als die Substanz selbst; und da sie ein Gas ist, so kann sie aus den Poren und der Umgebung des Salzes leicht entfernt werden. Aber sie sammelt sich wieder an, indem sie an der ursprünglichen Stelle erzeugt wird, und sofort ist die volle Aktivität der Substanz wieder hergestellt. Die Radiumemanation wird, wie Rutherford und Soddy gezeigt haben, bei einer Temperatur von ungefähr 150^0 unter Null flüssig; die Thoremanation wird bei ungefähr -120^0 C flüssig. Es sind ganz bestimmte Substanzen, obgleich sie nur vorübergehend existieren, sehr unbeständig sind und zerfallen.

Ablenkung der α-Strahlen.

Wenn die α-Strahlen der Einwirkung eines starken Magnetfeldes ausgesetzt werden, so werden sie, wenn auch in geringem Grade abgelenkt, und zwar in einer Richtung, welche anzeigt, daß sie aus positiv geladenen Teilchen bestehen. Rutherford und Becquerel haben beide diese Tatsache beobachtet, und Strutt hat das Vorhandensein der positiven Ladung bestätigt. Ganz vor kurzem hat aber Soddy[1]) die Vermutung ausgesprochen, daß diese positive Ladung durch Ionisierung beim Durchgang durch die

1) Siehe *Nature*, 2. August 1906.

Luft angenommen sein könnte, und daß in einem hinreichend hohen Vakuum keine Ablenkung beobachtet werden würde, woraus hervorgehen würde, daß sie an und für sich keine Ladung besitzen. Er glaubt dies durch ein sorgfältig ausgeführtes allerdings schwieriges Experiment bewiesen zu haben. Ein so wichtiges und in mancher Hinsicht unwahrscheinliches Resultat kann jedoch noch nicht als sicher erwiesen angesehen werden.

Rutherford war der erste, der die magnetische Ablenkung oder Krümmung der α-Strahlen beobachtete, ihre Richtung erkannte, sowie den Betrag derselben annähernd ermittelte. Er ließ sie zu diesem Zwecke in einem Magnetfeld gegen einen Strom von verdünntem Wasserstoff zwischen einer Gruppe von Metallplatten hindurchgehen, welche eine Art Gitter bildeten; und dieses hätte dunkel erscheinen müssen, wenn die Bahnen der fliegenden Teilchen nicht genau gerade Linien wären. Er machte so die Entdeckung, daß die Strahlen aus positiv geladenen Teilchen bestehen, und es gelang ihm, das Atomgewicht derselben annähernd zu bestimmen.

Becquerel ermittelte die magnetische Ablenkung der α-Strahlen in verschiedenen Entfernungen von der Quelle, indem er sie unter einem bekannten Winkel über eine photographische Platte streichen ließ. Die beobachtete Spur bestand in einer kurzen schiefen Linie mit einer schwachen Krümmung; wenn das Feld umgekehrt wurde, so wurde die Linie nach der entgegengesetzten Richtung abgelenkt, und so entstand als Gesamtbild die bekannte Figur eines fliegenden Vogels, in welchem die beiden Flügel zu einem sehr spitzen Winkel zusammengezogen sind. Aus Messungen des Abstandes der beiden Flügel an verschiedenen Punkten ergaben sich die gesuchten Daten.

Rutherford hat die Ablenkung der vom Radium ausgesandten α-Teilchen genau untersucht. Bei früheren von ihm selbst, sowie von Becquerel und Des Coudres ausgeführten Versuchen war eine dicke Radiumschicht benutzt worden; unter diesen Umständen werden aber die Teilchen mit sehr verschiedenen Geschwindigkeiten fortgeschleudert. Um eine homogene Strahlung zu erhalten, muß eine sehr dünne Schicht verwendet werden. Rutherford benutzte für diesen Zweck das Produkt Radium C, nämlich einen Teil des aktiven Niederschlags, der auf einem dünnen Draht

erscheint, welcher einige Stunden lang der Radiumemanation ausgesetzt wird. Dies ist ein Niederschlag von verschwindender Dicke, der durch kein anderes Mittel als die Radioaktivität entdeckt werden kann; er besteht aus Radium A, Radium B und Radium C. Die Aktivität von Radium A verschwindet in ungefähr einer Viertelstunde; Radium B sendet keine Strahlen aus; es bleibt also allein das Radium C übrig und dieses sendet nur α-Strahlen aus. Es verschwindet allerdings in einigen Stunden, aber diese Zeit ist für einen Versuch hinreichend. Die Methode, welche dabei angewandt wird, ist die folgende.

Die von dem Draht ausgehenden Strahlen gehen durch einen engen Spalt und fallen dann auf eine photographische Platte, die sich in einem Vakuum befindet. Ein gleichförmiges Magnetfeld wirkt parallel zu dem Spalt und infolgedessen werden die Strahlen gekrümmt. Dieses Feld wird alle zehn Minuten umgekehrt, so daß man nach Entwickelung der Platte zwei feine parallele Linien beobachtet, deren Abstand die doppelte Ablenkung repräsentiert; ihre Schärfe beweist, daß die Strahlen homogen waren. Die Bahn, welche einem Magnetfeld von 9470 C. G. S.-Einheiten entspricht, hatte einen Krümmungsradius von 42 Zentimeter.

Die Ablenkung durch ein elektrisches Feld wurde bei dieser Gelegenheit nicht beobachtet, aber Rutherford schätzte die Anzahl der vom Radium C pro Sekunde ausgesandten Teilchen auf $6{,}2 \times 10^{10}$ und die Wärmewirkung auf 31 Kalorien pro Stunde und berechnete vermittelst dieser Zahlen die Energieemission und fand für diese den Wert 0,36 Millionen Erg pro Sekunde. Aus diesem Resultat zusammen mit der magnetischen Ablenkung ergab sich, daß $u = 2{,}6 \times 10^9$ Zentimeter pro Sekunde und $e/m = 6500$ elektromagnetischen Einheiten ist.

Des Coudres fand unter Anwendung der magnetischen und der elektrischen Ablenkung für etwas mehr komplexe Strahlen $u = 1{,}65 \times 10^9$ und $e/m = 6400$.

Aktivität des Radiums bei allen Temperaturen.

Dewar und Curie haben gezeigt, daß bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs, d. h. bei — 252 C die Wärmeentwickelung des Radiums dieselbe ist wie bei gewöhnlichen Temperaturen.

Man hat ferner gefunden, daß es im festen und im gelösten Zustand in demselben Grade aktiv ist und daß durch Temperaturerhöhung die Aktivität nicht gesteigert wird.

Die Aktivität des Radiums, wie man sie in einem Crookesschen Spinthariskop beobachtet, ist bei der Temperatnr des flüssigen Wasserstoffs ebenso deutlich wie bei gewöhnlichen Temperaturen, vorausgesetzt, daß der betreffende Schirm nicht ebenfalls abgekühlt ist.

Spektrum des Radiums.

Wenn man vom Spektrum des Radiums spricht, so kann es sich um zwei verschiedene Erscheinungen handeln, die nicht verwechselt werden dürfen. Es kann das Spektrum des Radiums selbst gemeint sein, wenn es in eine Flamme gebracht oder der Einwirkung des elektrischen Funkens ausgesetzt wird; oder es kann das Spektrum des spontanen Glühens des Radiumchlorids oder Radiumbromids gemeint sein, welches im Dunkeln beobachtet werden kann. Das letztere Spektrum ist sehr schwer zu beobachten, weil es außerordentlich lichtschwach ist, aber es ist Sir William und Lady Huggins gelungen, es zu untersuchen und zu zeigen, daß es im wesentlichen das Spektrum des atmosphärischen Stickstoffs ist; dieser wird dabei ionisiert und durch die Anwesenheit von Radium in solchem Grade erregt, daß er ohne Temperaturerhöhung leuchtende Strahlung aussendet. Das spontane Glühen des Radiums wird wahrscheinlich durch seinen Einfluß auf andere Substanzen hervorgerufen, und gewöhnliches Glas, welches demselben ausgesetzt wird, wird trübe und nimmt die Eigenschaft der Thermolumineszenz an, d. h. es fängt an Licht auszusenden, wenn es auf eine Temperatur von ungefähr 500° erwärmt wird.

Eugène Néculcea gibt die folgende Tabelle des photographischen Funkenspektrums des Radiums, wie es von Demarçay beobachtet wurde. Die Wellenlänge ist in „Tenthmetern" angegeben. Das sichtbare Spektrum, welches nicht photographiert worden ist, enthält nur *eine* bemerkenswerte Linie, deren Wellenlänge 5665 ist. · Man vergleiche Runge, *Astrophysical Journal*, 1900, p. 1.

Die spektroskopische Methode ist zwar ungefähr millionenmal empfindlicher als die Methoden der gewöhnlichen chemischen

	Wellenlänge	Intensität		Wellenlänge	Intensität
Blau	4826,3	10	Violett	4600,3	3
	4726,9	5		4533,5	9
	4699,8	3		4436,1	8
	4692,1	7	Ultra-violett	4340,6	12
	4683,0	14		3814,7	16
	4641,9	4		3649,6	12

Analyse, aber für die Entdeckung des Radiums vermittelst seiner stärksten Linie, 3814,7, ist sie millionenmal weniger empfindlich als die elektrische Methode, welche das außerordentliche Ionisierungsvermögen seiner Radioaktivität benutzt. Nach Rutherford ist jedes vom Radium ausgesandte α-Teilchen imstande einige Hunderttausend Ionen zu erzeugen, bevor es zur Ruhe kommt, oder vielmehr, bevor seine ungeheure Anfangsgeschwindigkeit unter einen gewissen kritischen Wert sinkt, bei dem die ionisierende Wirkung aufhört. Ein geladenes Elektroskop von geeigneter Empfindlichkeit kann durch seine Entladung die Anwesenheit dieser Anzahl von Ionen anzeigen und ist daher imstande die Anwesenheit eines einzigen α-Teilchens bemerklich zu machen. Aber die Anzahl solcher Teilchen, die von einem Milligramm Radium mit voller Aktivität ausgesandt werden, wird auf hundert Millionen pro Sekunde geschätzt.

Erzeugung von Elektrizität.

Das Vermögen des Radiums, fortwährend Elektrizität zu entwickeln, wurde zuerst von Wien dadurch nachgewiesen, daß er eine Röhre mit Radium in einem Vakuum aufhing. Dorn beobachtete, daß beim Öffnen einer Röhre, die Radium enthält, zuweilen ein Funken entsteht. Strutt konstruierte einen sinnreichen Apparat, der die ununterbrochene Erzeugung von Elektrizität zu beobachten gestattet. Die Wirkung des Apparates beruht auf der großen Verschiedenheit des Durchdringungsvermögens der positiven α-Teilchen und der negativen β-Teilchen, die es ermöglicht, die einen zurückzuhalten und die anderen entweichen zu lassen.

Die Einrichtung dieses „perpetuellen“ Erzeugers von Elektrizität und mechanischer Energie ist aus Fig. 22 ersichtlich. In einem hohen Vakuum befindet sich, durch einen isolierenden Quarzstab befestigt, eine kleine Röhre, welche Radiumsalz enthält, die an ihrem unteren Ende zwei Gold- oder Aluminiumblättchen trägt und deren Außenseite hinreichend leitend gemacht ist; ein Metallstreifen, mit dem die Wand des Vakuumgefäßes belegt ist, ist mit der Erde verbunden. Das Radium gibt positive und negative Teilchen in gleichen Mengen ab. Die negativen

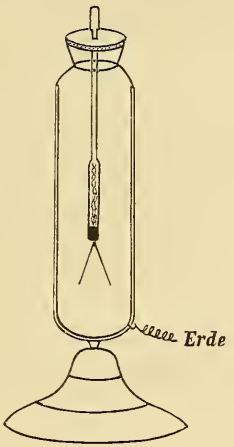


Fig. 22.

Strutts Apparat zur Demonstration der Erzeugung von Elektrizität durch Radium.

entweichen größtenteils, da sie klein sind und ein großes Durchdringungsvermögen besitzen, während sich die positiven ansammeln und die Goldblättchen nach und nach mit positiver Elektrizität laden. Diese entladen sich von Zeit zu Zeit, indem sie mit der Gefäßwand in Berührung kommen. Das hohe Vakuum ist nötig, weil sonst die innere Atmosphäre infolge der Ionisierung durch den Stoß der fliegenden Teilchen leitend werden und daher verhindern würden, daß die Goldblättchen geladen werden.

Radioaktivität gewöhnlicher Substanzen.

Selbst in Abwesenheit von Radium verliert in der Regel ein Elektroskop seine Ladung schneller, als sich durch ein Entweichen durch die isolierenden Teile erklären lassen würde. Die Ursache dieses Elektrizitätsverlustes muß darin gesucht werden, daß die Luft ionisiert ist und sich in einem Zustand von Gaselektrolyse

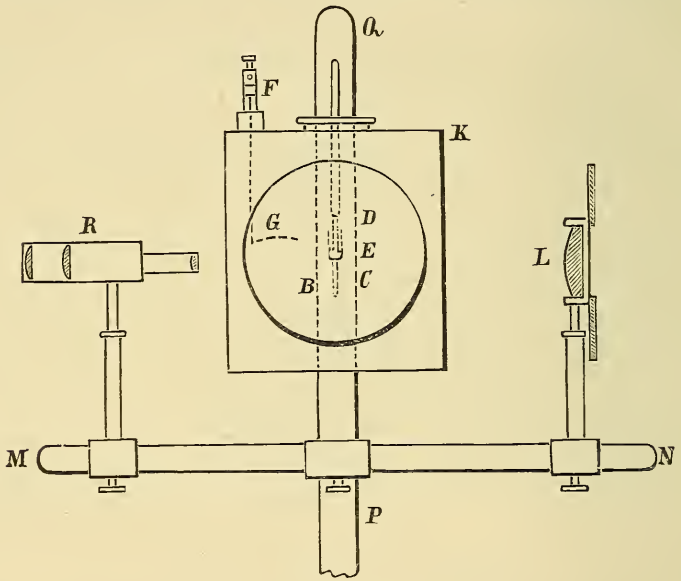


Fig. 23.

Righische Form eines Elektroskops oder Elektrometers von geringer Kapazität. Die wesentlichen Teile *DECB* mit dem Goldblatt sind in größerem Maßstab in Fig. 24 abgebildet. Sie befinden sich in einem Metallbehälter mit einem beweglichen Draht *G*, durch den sie von außen her geladen werden können. Die Ablesung geschieht vermittelst eines Ablesemikroskops *R*: eine gewöhnliche Millimeterskala steht in dem einen von zwei konjugierten Punkten der Linse *L* und wird in die Ebene projiziert, in welcher sich das Goldblatt befindet. Die radioaktiven Substanzen befinden sich außerhalb des Behälters vor einem Fenster von sehr dünner Aluminiumfolie.

befindet. Die Ionisierung rührt zum Teil von zufälliger Strahlung von außen her, zum Teil aber kann sie durch die Radioaktivität des Materials erzeugt sein, mit der das Innere des Elektroskops bekleidet ist. Bestimmte Versuche dieser Art sind von Mc Lennan

und Burton in Toronto und von Strutt, sowie von A. Wood, Rutherford und Cooke ausgeführt worden. Wenn zur Bekleidung des Elektroskops Zylinder von Zink, Zinn oder Blei benutzt wurden, so wurde ein gewisser Elektrizitätsverlust beobachtet. Dieser wurde jedoch auf 30 Prozent reduziert, wenn das Ganze in Wasser eingetaucht wurde, um das Innere vor äußerer Strahlung zu beschützen.

Rutherford und Cooke umgaben das Elektroskop mit dicken Schirmen verschiedener Art, in einem Falle mit nicht weniger als fünf Tonnen Blei. Es zeigte sich aber, daß ein Schirm von ge-

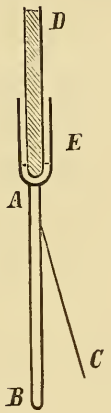


Fig. 24.

Wesentlicher Teil des Elektroskops von Fig. 23, vierfach vergrößert. Der Stab *AB* mit dem Goldblatt *C* ist mit einer kleinen Metallkapsel verbunden und durch einen Tropfen Mastix oder Guttapercha an den Quarzstab *D* angekittet; die Kapazität des Instrumentes ist äußerst klein und die Möglichkeit, daß die Ladung entweicht, sehr gering.

ringerer Masse dieselbe Wirkung hatte wie ein solcher von größerer Masse; der Einfluß der von außen her durchdringenden Strahlung konnte also vernichtet werden, ohne mehr als dreißig Prozent der Entladung zu verhindern; die übrigen siebzig Prozent scheinen also von innerer Radioaktivität herzurühren. Substanzen wie Backstein scheinen besonders stark radioaktiv zu sein, und Metalle, die der äußeren Atmosphäre ausgesetzt gewesen sind, sind stärker radioaktiv als solche, bei denen dies nicht der Fall ist.

Aber abgesehen von dieser induzierten oder erregten Aktivität untersuchten Strutt und andere zahlreiche Substanzen und fanden für jede besondere charakteristische Wirkungen.

Die Frage, ob von Metallen jeder Art spontan Strahlung ausgesandt wird, und nicht nur von den wenigen Substanzen, die deutlich radioaktiv sind, ist von Norman R. Campbell vom Trinity College in Cambridge eingehend studiert worden (*Phil. Mag.*, 7. Februar 1906). Seine Versuche machen es sehr wahrscheinlich, daß eine solche Strahlung wirklich existiert, da sie alle die Luft in ihrer Nähe ionisieren. Ferner zeigen die Versuche eine charakteristische oder spezifische Qualität in der Radioaktivität der verschiedenen Substanzen an, was der Annahme widerspricht, daß sie durch eine Verunreinigung, etwa durch eine in allen Metallen enthaltene äußerst geringe Spur Radium erzeugt wird. Diese Tatsache spricht vielmehr dafür, daß jedes Metall eine spezifische Radioaktivität besitzt, die *nicht* von einer Verunreinigung herrührt.

Es ist noch nicht mit Sicherheit nachgewiesen, daß diese mit der eigentlichen Radioaktivität identisch ist, die von einer Atomverwandlung oder Substanzverwandlung begleitet ist; da aber die Strahlen zum großen Teil aus α-Strahlen bestehen, so unterliegt es kaum einem Zweifel, daß die vollständige Identität des Prozesses binnen kurzem nachgewiesen werden wird.

Es ist noch zu bemerken, daß die Natur der α-Teilchen noch nicht mit Bestimmtheit festgestellt ist. Vieles spricht zu Gunsten der Ansicht, daß sie Heliumatome sind oder etwas, was unmittelbar in Helium übergeht, aber Erwägungen über das Atomgewicht machen es wahrscheinlich, daß die α-Teilchen, wie sie fortgeschleudert werden, halbe Atome sind; diese merkwürdige Hypothese bedarf allerdings noch einer eingehenden Prüfung, bevor sie angenommen wird.

Analogie mit „Bevölkerung".

Da die Radioaktivität einen Zerfall und Verlust von Material anzeigt und von einem solchen begleitet ist, so können Substanzen von sehr hoher Radioaktivität nur in spärlicher Menge existieren. Gewöhnliche permanente Substanzen können nicht heftig radioaktiv sein, obwohl jedes Gramm derselben pro Se-

kunde einige Tausend Atome verlieren kann, ohne daß wir imstande sind, den Verlust durch Wägen zu entdecken, selbst dann nicht, wenn die Wägungen ein ganzes Jahrhundert wiederholt werden. Die vorhandene Menge einer Substanz muß von der Menge abhängen, die in einer gewissen Zeit entsteht, von ihrer Lebensdauer und von der Menge, die in derselben Zeit zerfällt, ebenso wie die Bevölkerung eines umgrenzten Gebietes von der Anzahl der Geburten, der mittleren Lebensdauer und der Anzahl der Sterbefälle abhängt.

19. Kapitel.

Strahlung von einem Elektronenring und ihre Bedeutung für die Konstitution des Atoms.

Wenn auch das Strahlungsvermögen eines einzelnen schwingenden oder umlaufenden Elektrons beträchtlich ist, selbst wenn die Geschwindigkeit keine außergewöhnlich hohe ist, so ist doch zu bemerken, daß der Betrag der ausgesandten Strahlung bedeutend geringer ist, wenn ein zweites, symmetrisch gelegenes Teilchen eingeführt wird, weil es sich hinsichtlich seiner Wirkung nach außen hin in der entgegengesetzten Phase befindet wie das erste. Die Verminderung macht sich in besonders hohem Grade bemerklich, wenn die Geschwindigkeit gering ist. Um die Strahlung zu befördern, müßte das zweite Elektron am entgegengesetzten Ende eines Durchmessers vom entgegengesetzten Vorzeichen sein als das erste.

Drei gleichartige Elektronen an den Ecken eines gleichseitigen Dreiecks strahlen viel weniger als zwei; und so wird mit der Zunahme der rotierenden Teilchen eines symmetrischen Systems das Strahlungsvermögen immer geringer, bis schließlich, wenn die Teilchen einen kontinuierlichen Ring bilden, überhaupt keine Strahlung ausgesandt wird, weil dann alles kontinuierlich ist.

Professor J. J. Thomson hat den Betrag berechnet, um den die Strahlung geringer wird, wenn die Anzahl der Teilchen zunimmt, und gezeigt, wie sehr sie von der Geschwindigkeit der Teilchen abhängt. Bei einer Umlaufsgeschwindigkeit gleich einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit strahlen zwei Elektronen an den entgegengesetzten Enden eines Durchmessers ungefähr ein Zehntel soviel wie jedes von ihnen allein; vier Elektronen an den Ecken

eines Quadrats, die ebenfalls mit einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit in ihrer eignen Ebene rotieren, haben ein Strahlungsvermögen von ungefähr einem Sechstausendstel desjenigen eines einzelnen Elektrons.

Wenn aber die Geschwindigkeit der Teilchen nur ein Hundertstel der Lichtgeschwindigkeit ist — was bei den Elektronen, welche ein Atom bilden, oft, vielleicht in der Regel der Fall sein muß — so würde die Strahlung eines Paares nur gleich dem tausendsten Teil der Strahlung eines einzelnen Elektrons sein. Für drei sinkt das Strahlungsvermögen auf ungefähr ein Zweimilliontel, und für sechs auf etwa ein Trilliontel, d. h. in diesem Falle existiert so gut wie gar kein Strahlungsvermögen mehr.

Die genauen Zahlen und die Berechnung finden sich im *Philosophical Magazine* für Dezember 1903, p. 681.

Dies alles gilt nur unter der Voraussetzung, daß die Elektronen symmetrisch um das Rotationszentrum angeordnet sind; wenn aber durch irgend eine Ursache — wie ein Zusammenstoß von Atomen oder chemische Kollision — die symmetrische Anordnung der Elektronen zerstört wird, so rotiert ihr Schwerpunkt um das ursprüngliche Zentrum und sie wirken als ein einfaches Elektron oder vielmehr als ein Elektron von vielfacher Masse und Konstitution. Die einzelnen Teilchen kompensieren sich jetzt in dieser exzentrischen Bewegung keineswegs. Infolgedessen muß die Strahlung sofort sehr heftig werden, und sie muß als die Quelle des sichtbaren Spektrums betrachtet werden. Die Natur der Linien dieses Spektrums hängt von der Struktur des zusammengesetzten Körpers ab, der jetzt infolge der vorübergehenden Verschiebung als einzelner Radiator von großem Strahlungsvermögen wirkt. In dieser Weise ist es zu verstehen, daß die besondere Art der Strahlung, wie sie sich im Spektrum offenbart, durch den Charakter des zusammengesetzten Körpers bestimmt wird, während die Strahlung selbst auf die Perioden beschränkt ist, während deren die Verschiebung infolge chemischen Zusammenprallens wirksam ist. Diese Perioden sind in jedem einzelnen Falle vermutlich sehr kurz, aber sie werden in dem Aggregat sehr schnell durch die Vereinigung oder Kollision anderer Moleküle erneuert.

Die durch hohe Temperatur bewirkte Strahlung wird vielleicht in einer ähnlichen diskontinuierlichen und heftigen Weise erzeugt und findet in den Intervallen regelmäßiger Bewegung überhaupt nicht statt.

Unbeständigkeit des Atoms.

Daß nach der elektrischen Theorie zu erwarten ist, daß das Atom in seiner Entwickelung bei gewissen kritischen Punkten unbeständig ist, beruht nach J. J. Thomson vielleicht darauf, daß ein rotierender Ring von Elektronen nur beständig ist, solange ihre Winkelgeschwindigkeit einen gewissen kritischen Wert nicht überschreitet. Drei Elektronen sind allerdings auch im ruhenden Zustand stabil, aber durch Rotation werden sie in noch höherem Grade stabil; dagegen sind vier in einer Ebene an den Ecken eines Quadrates liegende Elektronen nur dann stabil, wenn sie mit der Winkelgeschwindigkeit rotieren, die größer ist als $\sqrt{0{,}325\,\frac{Ne^2}{\varkappa m b^3}}$ oder $0{,}57\,c$, wie es im folgenden Kapitel genannt ist. Sobald ihre Geschwindigkeit unter diesen Wert sinkt, ordnen sie sich an den Ecken eines Tetraeders an. Der Übergang aus der alten in die neue Anordnung findet plötzlich statt und ist dem Umfallen eines Kreisels vergleichbar, wenn dessen Rotationsgeschwindigkeit unter einen gewissen kritischen Wert gesunken ist.

Fünf Korpuskeln können bei größerer Rotationsgeschwindigkeit in einer Ebene stabil sein; bei sechs in einem Ring angeordneten Korpuskeln ist Stabilität bei jeder Geschwindigkeit unmöglich; wenn aber eine von ihnen oder eine siebente in die Mitte des Ringes gebracht wird, so wird das System stabil; und bei geeigneter Geschwindigkeit können jetzt sieben oder gar acht Korpuskeln in einem Ring sein, aber nicht mehr, wenn nicht mehr Korpuskeln in die Mitte gebracht werden. Wenn sich z. B. in der Mitte drei befinden, so bilden diese hier ein Dreieck und um sie herum kann ein Ring von zehn weiteren Korpuskeln bestehen. Ein Ring von zwölf Korpuskeln ist aber nur dann stabil, wenn sich innerhalb desselben deren sieben befinden; sechs oder fünf derselben können einen zweiten Ring bilden, in dessen Mitte sich eine oder zwei befinden. Auf diese Weise kann eine große

Anzahl von Korpuskeln, die alle schnell rotieren, in einer Reihe von Ringen angeordnet sein; sobald aber die Geschwindigkeit eines solchen Ringes unter einen gewissen kritischen Wert sinkt, so wird er unbeständig, und die Korpuskeln ordnen sich zu einer neuen Konfiguration an, was eine plötzliche Erschütterung in der hypothetischen Struktur des Atoms zur Folge haben muß. Diese Neuanordnung der Korpuskeln ist mit einer Abnahme der potentiellen und einer Zunahme der kinetischen Energie verbunden, und dies kann die Veranlassung sein, daß einige Korpuskeln fortgeschleudert werden.

Eine solche Erschütterung muß nach dieser Theorie ohne Zweifel von Zeit zu Zeit eintreten, wenn es auch ein seltenes Ereignis in dem Leben eines Atoms sein mag; denn umlaufende Elektrizitätsladungen müssen notwendigerweise Energie ausstrahlen wenn auch in der Regel in sehr geringem Grade — und infolgedessen muß ihre Geschwindigkeit nach und nach kleiner werden, bis sie früher oder später den kritischen Wert erreicht, bei der eine Erschütterung eintreten muß. Die Erschütterung hat eine Anordnung zu einer neuen Konfiguration und die Umwandlung in ein anderes Element oder wenigstens, wenn kein Fragment verloren geht, in eine allotropische Form der ersten Elemente zur Folge; und das Ereignis ist von Radioaktivität begleitet und wird durch diese angezeigt.

Eine Liste der Reihe von Umwandlungen, die man tatsächlich beobachtet hat, ist oben im 18. Kapitel gegeben.

Kosmische Analogie.

Das gelegentliche Zerplatzen eines einzelnen Atoms einer zahlreichen Gruppe kann man unter den Himmelserscheinungen mit dem Erscheinen eines neuen oder temporären Sterns vergleichen. Beide Erscheinungen sind Ausbrüche einer Art Radioaktivität, wenn sie auch durch verschiedene Ursachen hervorgerufen sein mögen; es sind verhältnismäßig seltene Ereignisse, wenn man die Gesamtzahl der Körper berücksichtigt, die einer solchen Explosion oder Kollision fähig sind.

Wenn wir annehmen, daß in einem Gramm gewöhnlicher terrestrischer Materie jede Sekunde Tausend solcher Eruptionen

stattfinden, so würde dies ungefähr *einem* neuen Stern pro Jahrhundert unter einem kosmischen Haufen von zehntausend Millionen Körpern entsprechen.

Andere Erklärung der Unbeständigkeit der Atome.

Eine andere Erklärung der Natur der Unbeständigkeit wurde von mir gegeben. Ein Elektron, welches sich um ein Atom herumbewegt, indem es von diesem mit einer dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportionalen Kraft angezogen wird, muß sich, da es durch Strahlung Energie verliert, dem Atom immer mehr nähern, und seine Geschwindigkeit muß der Quadratwurzel der Entfernung umgekehrt proportional zunehmen. Da also die Geschwindigkeit zunimmt, muß die wirksame Trägheit des Teilchens größer werden, und infolgedessen wird es immer schwieriger werden, es durch die Zentripetalkraft in einer geschlossenen Bahn zurückzuhalten, denn da diese Kraft nur eine elektrische Anziehung ist, so ist sie nicht eine Funktion der Geschwindigkeit oder, wenn sie eine Funktion der Geschwindigkeit ist, so ist sie eine Funktion, die abnimmt, wenn die Geschwindigkeit zunimmt. Es muß also schließlich einmal der Fall eintreten, daß die elektrische Anziehung nicht mehr imstande ist, die umlaufende Masse festzuhalten, und diese fängt dann an sich mit der nun erreichten Geschwindigkeit etwas weiter zu entfernen; hierdurch vermindert sie aber die Kraft, welche sie festhält, noch mehr, ohne die Zentrifugalkraft zu vermindern, die sie selbst ausübt; und infolgedessen ist das Gleichgewicht gestört. Das Gleichgewicht in dem Punkte der größten Annäherung ist instabil, und das Teilchen selbst fliegt mit der erlangten Geschwindigkeit in der Richtung der Tangente fort, und so beginnt die von Becquerel entdeckte Art der Radioaktivität, die Emission von heftig fliegenden Elektronen oder β-Strahlen.

Durch derartige Verluste kann der ganze Atombau zusammenfallen, und die Neuanordnung seiner Substanz scheint zuweilen stattzufinden, und dabei fliegt ein Teil derselben als materielles Projektil fort. Diese fortgeschleuderten Teilchen bilden die beobachteten α-Strahlen. Zuweilen werden auch Elektronen fortgeschleudert.

Der plötzliche Ausstoß eines Elektrons, ebenso die plötzliche Hemmung eines solchen ist geeignet, die von Röntgen entdeckten Ätherschwingungen zu erregen, die bei der spontanen Radioaktivität als γ-Strahlen beobachtet werden.

Elektrische Theorie der Materie.

Eine von Professor J. J. Thomson gegebene meisterhafte Beschreibung eines Schemas oder Modells für die Konstitution der Atome verschiedener Arten von Elementarsubstanzen, bestehend aus Elektronengruppen, die sich nach dem Gesetz vom einfachen Abstand in ebenen Bahnen um ein Zentrum bewegen, nebst Angaben über das Spektrum und die chemischen Eigenschaften solcher Substanzen, sowie eine auf diese hypothetische Konstitution begründete Ableitung einer Reihe ähnlich wie die Mendelejeffsche findet der Leser im *Phil. Mag.* vom März 1904.

Wenn wir gegenwärtig weitere Beweise dafür hätten, daß diese Auffassung des Atoms richtig ist — wenn es möglich wäre zu verstehen, was die positive Elektrizität ist, die als eine durchdringliche Kugel existiert, die zahlreiche Elektronen enthält — so würde es angemessen sein, auf diese bemerkenswerte und anziehende Theorie näher einzugehen; da aber das Licht, welches in der letzten Zeit auf dieses Gebiet gefallen ist, noch etwas flimmernd und unsicher ist und daher leicht Verwirrung anrichten kann — siehe Kapitel 15, 17 und 20 — so halte ich es für besser, die weitere Diskussion dieser vielversprechenden, aber naturgemäß noch unsicheren Hypothese zu verschieben und einstweilen weitere theoretische und experimentelle Beweise abzuwarten. Hier kann weder die Theorie allein, noch das Experiment allein zum Ziel führen; ein Fortschritt ist nur von einer genialen Verschmelzung beider zu erwarten, und gerade dieses Zusammenwirken von Theorie und Experiment, von hoch entwickelter mathematischer Theorie und scharfsinnigem Experiment, war es, dem wir in den letzten Jahren die schönsten Fortschritte in der Physik zu verdanken haben.

20. Kapitel.

Schwierigkeiten in der elektrischen Theorie der Materie.

1. Die Entstehung der Spektrallinien.

Lord Rayleigh hat im *Phil. Mag.* vom Januar 1906 darauf hingewiesen, daß, wenn die von den Atomen ausgehende Strahlung von einem Stoß und der allmählichen Rückkehr in die Gleichgewichtslage herrührt, die Reihe von Schwingungen, welche man erhält, eine einfache Beziehung zwischen den *Quadraten* der Schwingungszahlen zeigen würden, wie es bei Platten und Glocken und anderen elastischen Körpern der Fall ist, und nicht zwischen den Schwingungszahlen selbst. Dagegen ergibt sich aus den Spektralbeobachtungen von Rydberg sowie von Kayser und Runge, daß einfache Ausdrücke für die *erste Potenz* der Schwingungszahl und der konstanten Differenzen der Schwingungszahlen einer Reihe von Linien mit den Tatsachen in Einklang stehen.

Wellen dieser beobachteten Art würden von Elektronen ausgesandt werden, die infolge ihrer ungestörten Orbitalbewegung oder einer anderen regelmäßigen Begleiterscheinung der Konstitution des Atoms schwingen, sie würden dagegen nicht die Folge einer oszillatorischen Rückkehr aus einer Störung in den Gleichgewichtszustand sein.

Die natürlichen Schwingungszahlen eines ungestört rotierenden Ringes von Korpuskeln z. B. würden Funktionen der Winkelgeschwindigkeit, der Anzahl der Korpuskeln in dem Ring sowie andern Konstanten sein.

(So würden z. B. nach der erwähnten Abhandlung für zwei rotierende Korpuskeln, deren jede die Masse m und die Ladung e besitzt und die mit der Winkelgeschwindigkeit ω innerhalb einer sphärischen Masse von der positiven Ladung Ne und dem Radius b rotieren, die möglichen Schwingungszahlen die folgenden sechs Werte haben, die ihren sechs Freiheitsgraden entsprechen:

$$0,\ \omega,\ c,\ c-\omega,\ c+\omega,\ \sqrt{3c^2+\omega^2},$$

wenn $Ne^2/\varkappa m b^3$ mit c^2 bezeichnet wird.

Die Schwingungszahlen c und ω gehören zu Schwingungen senkrecht zur Ebene der Bahn, die anderen zu Schwingungen in dieser Ebene.

Wenn angenommen wird, daß positive Elektrizität von der Dichte ϱ gleichförmig durch die ganze Kugel verteilt ist, so ist Ne/b^3 gleich $\frac{4}{3}\pi\varrho$; und c^2 ist das Verhältnis dieser Größe zum elektrochemischen Äquivalent eines Elektrons in elektrostatischem Maße. Der Zahlenwert von $c/\sqrt{N}$ ist annähernd 10^{16}, so daß c hoher ultravioletter Strahlung entspricht.

Für drei Korpuskeln gibt es neun Freiheitsgrade, sechs in der Ebene und drei senkrecht zu derselben. Die entsprechenden Schwingungszahlen sind.

$$0,\ \pm\omega,\ c,\ \omega \pm c,\ \sqrt{3c^2+\omega^2},\ \omega \pm \sqrt{\tfrac{1}{2}(3c^2-\omega^2)}.$$

Wenn keine Rotation stattfindet, so werden in jedem der beiden betrachteten Fälle drei von den Schwingungszahlen einander gleich und zwei gleich Null.)

Gewöhnlich ist aber die durch die Konstitution des Atoms bedingte Strahlung so schwach, daß sie kaum wahrnehmbar ist; und die Strahlung, welche Licht aussendet und ein Spektrum erzeugt, ist bekanntlich die Folge einer heftigen Bewegung chemischer Natur; um sie hervorzubringen, ist etwas wie Kollision erforderlich. Dann würde aber jeder kollisionsartige Vorgang in der Natur eine Reihe von Schwingungen erzeugen, die durch das Quadrat der Schwingungszahl charakterisiert sind.

Die Schwierigkeit, welche sich hieraus ergibt, kann vielleicht durch die bereits auf S. 165 gemachte Annahme überwunden werden, daß während der fraglichen chemischen Kollision der

Schwerpunkt des umlaufenden Systems eine Verschiebung erleidet. Eine derartige Exzentrizität oder eine andere Zerstörung der Symmetrie würde sofort ein starkes Strahlungsvermögen entwickeln; aber es ist nicht ausgeschlossen, daß die Strahlung das Gesetz befolgt, in welchem die erste Potenz vorkommt, und nicht das Gesetz, in welchem die zweite Potenz der Schwingungszahl vorkommt, indem das erstere bei der Orbitalbewegung, das letztere bei der oszillierenden Bewegung zur Geltung kommt. Mit anderen Worten, die *Tatsache* der beträchtlichen Strahlung würde von der Kollision, dagegen die *Form* der ausgesandten Strahlung von der zuvor existierenden Konstitution herrühren, auf welche die Störung jetzt ein temporäres Strahlungsvermögen von beträchtlicher Größe übertragen hatte, temporär deshalb, weil die Strahlung selbst die Energie der Störung schnell erschöpfen und alsbald den ursprünglichen Zustand wiederherstellen muß.

Es mag anscheinend eine offene Frage sein, ob eine Störung des Schwerpunktes das Fortbestehen der ruhigen Orbitalbewegung gestattet oder ob sie zu einer Katastrophe führt. Aus einfachen mechanischen Betrachtungen (*Phil. Mag.*, März 1904, p. 264) geht jedoch hervor, daß eine solche Katastrophe nicht zu erwarten ist, wenn das Kraftgesetz das der einfachen Proportionalität ist, wie es innerhalb der hypothetischen Kugel positiver Elektrizität der Fall ist, im Gegenteil, ein Dreieck oder eine andere Gruppe von Korpuskeln, wie sehr sie auch verschoben wird, wenn sie nur nicht die Grenze der einschließenden Kugel erreicht, wird fortfahren, mit derselben relativen Lage der Korpuskeln wie vorher um den gemeinsamen Schwerpunkt zu rotieren, während dieser selbst um den Mittelpunkt der einschließenden Kugel rotiert. Eine solche verschobene Gruppe — die als eine einzelne aber zusammengesetzte Korpuskel wirkt — wird jetzt ein großes Strahlungsvermögen besitzen.

Es ist von Interesse auf Grund der Hypothese, daß die Masse einer Korpuskel ausschließlich elektrisch ist, die Konstante c weiter zu interpretieren; sie hat die Dimensionen einer Schwingungszahl; denn

$$c^2 = \frac{N e^2}{\varkappa m b^3}, \text{ während } m = \frac{2 \mu e^2}{3 a}.$$

Also ist

$$c^2 = \frac{3\,\mathrm{N}\,a}{2\,\mu\,\varkappa\,b^3} = \frac{3\,\mathrm{N}\,a\,v^2}{2\,b^3}$$

oder

$$c = \frac{v}{b}\sqrt{1{,}5\,\mathrm{N}\,\frac{a}{b}}.$$

Nimmt man für b atomistische und für a elektronische Dimensionen an, so erhält man

$$c = \frac{3 \times 10^{10}}{10^{-8}}\sqrt{\mathrm{N} \times 10^{-5}} = 10^{16}\sqrt{\mathrm{N}}\ \text{pro Sekunde.}$$

Da $\mathrm{N}e$ die positive Ladung ist, so ist N die Gesamtanzahl der Korpuskeln, die in dem Atom enthalten ist, nicht die Anzahl, welche in einem Ring desselben enthalten ist.

Ein zusammengesetzter Satellit rotiert um das Kraftzentrum mit derselben Winkelgeschwindigkeit, als wenn er einfach wäre, da seine Masse und seine Ladung in demselben Verhältnis vergrößert sind; die Ladungen sind nicht in einen einzigen Punkt konzentriert, was nötig sein würde, um die Masse über das einfache Vielfache hinaus zu vergrößern.

Eine Abhandlung von Prof. Jeans, jetzt in Princeton, in welcher die von Lord Rayleigh angeregte Diskussion weiter verfolgt wird, findet sich im *Phil. Mag.* für April 1906, eine weitere Abhandlung in der genannten Zeitschrift vom November 1901.

2. Versuch, die Anzahl der Korpuskeln in einem Atom zu bestimmen.

Professor J. J. Thomson hat in einer Abhandlung im *Phil. Mag.* für Juni 1906 drei verschiedene Tatsachen für die Annahme geltend gemacht, daß die Anzahl der Elektronen in einem Atom mit dem Atomgewicht vergleichbar ist, wenn der Wasserstoff als Einheit genommen wird. Diese Annahme macht den Eindruck großer Unwahrscheinlichkeit, aber um sie zu widerlegen, gibt es keinen anderen Weg als entweder die Zuverlässigkeit der Versuche und die auf sie angewandte Theorie in Zweifel zu ziehen oder sich vorzustellen, daß das, was gemessen ist, nicht die Gesamtanzahl der Elektronen ist, sondern nur die Anzahl der freien

oder wirksamen oder in eigentümlicher Weise angeordneten Elektronen. Vgl. S. 145.

Einer von den Beweisen für diese Annahme ist im wesentlichen der folgende.

Wenn das Atom aus positiver und negativer Elektrizität besteht, so werden diese Ladungen bestrebt sein, sich trotz ihrer gegenseitigen Anziehung voneinander zu trennen, wenn sie der Wirkung eines äußeren elektrischen Feldes ausgesetzt sind, z. B. des Feldes, welches in einer Lichtwelle existiert; und da eine Lichtwelle im Vergleich mit einem Atom groß ist, so wird genügende Zeit sein, daß bei jedem Puls ein gewisser Betrag dieser Trennung bewirkt werden kann. Infolgedessen wird die Welle sozusagen durch die elektrischen Ladungen „belastet", ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit wird vermindert und die Welle erleidet eine Brechung.

Der Betrag der Belastung, d. h. der Betrag der wirksamen Spannung oder alternierenden Trennung der beiden Elektrizitäten hängt aber von ihren Massen ab; und wenn die Masse der positiven oder der negativen Elektrizität sehr klein oder gleich Null wäre, so würde sie vollständig verschoben werden, so kurz auch die Zeit sein mag. Eine kurze Welle würde also ebenso stark verzögert werden wie eine lange, d. h. es würde keine Differenzierung der Wellen und also keine Zerstreuung stattfinden. Die wirklich beobachtete Dispersion bildet daher ein Maß für die relative Trägheit der beiden Arten von Elektrizität in einem Atom.

Die einzige Substanz, auf welche diese Theorie der Brechung und Dispersion angewandt werden kann, muß eine solche sein, deren Atome individuell oder in isolierter Weise wirken, d. h. sie muß ein Gas, und zwar ein möglichst vollkommenes Gas sein. Das Dispersionsvermögen des Wasserstoffes ist nun gemessen worden, und es ist nicht gleich Null; folglich muß sowohl die positive als auch die negative Elektrizität, aus denen nach der Hypothese ein Atom Wasserstoff besteht, etwas Masse enthalten, und der gemessene Betrag der Dispersion setzt uns in den Stand zu sagen, welches die kleinere Masse ist. Das Resultat ist dieses. Wenn M die Gesamtmasse der Träger positiver Elektrizität und nm die Masse der Träger negativer Elektrizität (n ihre Anzahl), die Gesamtmasse des Atoms also $M + nm$ ist, so erhalten wir

mit Hilfe von Kettelers Messung des Brechungsexponenten des Wasserstoffs für Licht von verschiedenen Wellenlängen

$$\frac{M}{M + nm} \cdot \frac{1}{n} = 1 \text{ (annähernd).}$$

Dies beweist, daß für ein Wasserstoffatom n annähernd 1 ist (und eine ganze Zahl muß es sein); es beweist ferner, daß M im Vergleich mit nm nicht klein, sondern im Gegenteil viel größer ist. Dies ist ein unerwartetes und überraschendes Resultat.

Die beiden anderen Beweise scheinen den ersten zu bestätigen. Der zweite stützt sich auf Messungen über die durch Gase zerstreute Energie der Röntgenstrahlung, die von Barkla in Liverpool ausgeführt wurden, und sie kommt zu dem Ergebnis, daß jedes Luftmolekül annähernd 25 bis 28 Korpuskeln enthält, was mit dem Molekulargewicht des Hauptbestandteils in Einklang steht.

Der dritte Beweis stützt sich auf die Absorption der β-Strahlen durch Metalle und zeigt, daß die Anzahl der Korpuskeln, die in jedem Atom enthalten sein können, nahezu gleich dem Atomgewicht des Metalls nach der Wasserstoffskala ist.

Diese bemerkenswerthe Abhandlung bildet den wichtigsten Einwand, der bis jetzt gegen die elektrische Theorie der Materie, wenigstens gegen die Theorie in ihrer einfacheren Form erhoben worden ist; wie die Sache aufgeklärt werden kann, ist in Kapitel 15 und 17 angedeutet worden.

21. Kapitel.

Giltigkeit älterer Ansichten über elektrische Erscheinungen.

Da man jetzt annimmt, daß die Elektrizität, wenigstens die negative Elektrizität ihren Sitz in kleinen Ladungen oder geladenen Körpern hat, und daß ein Strom als Transport wirklicher Elektrizität behandelt werden kann, kann es zweifelhaft erscheinen, ob die vor kurzem als „modern" bezeichnete Ansicht, daß die Energie eines elektrischen Stromes ihren Sitz in dem Raum um den Leiter hat, noch berechtigt ist. Die beiden Annahmen widersprechen sich aber keineswegs. Die Felder eines Elektrons befinden sich ganz außerhalb desselben; seine Energie hat ihren Sitz in seinen Feldern und in dem Raum um es herum wird Energie transportiert, wenn es sich bewegt; denn der Äther in diesem Raum ist der Koexistenz eines elektrischen und eines magnetischen Feldes unterworfen. Daher hat auch seine Trägheit ihren Sitz in dem umgebenden Raum, denn sie wird durch die Reaktion erklärt, die es erleidet, wenn sich sein magnetisches Feld ändert, d. h. wenn seine Bewegung beschleunigt wird.

Was die Trägheit der Materie betrifft, so wird gewöhnlich angenommen, daß diese ihren Sitz in der Materie selbst hat; die elektrische Trägheit dagegen hat ihren Sitz bekanntlich in dem den Kern umgebenden Raum. Und doch haben wir die Ansicht ausgesprochen und vertreten, daß die materielle Trägheit und die elektrische Trägheit ihrem Wesen nach identisch sind.

Ist dies nicht ein Widerspruch?

Daß dies nur scheinbar ein Widerspruch ist, zeigt sich, wenn wir bedenken, wie außerordentlich lokal und konzentriert der

intensive Teil des Feldes eines Elektrons ist. In gewissem Sinne kann man sagen, daß ein bewegter Körper, z. B. ein Wirbelring, die ganze Atmosphäre stört; aber eine wahrnehmbare Störung findet nur in unmittelbarer Nähe des Ringes statt. Ebenso ist es bei einem Elektron. Das magnetische Feld nimmt ab im umgekehrt quadratischen Verhältnis der Entfernung vom bewegten Kern; daher ist es in einer Entfernung von weit weniger als ein Mikromillimeter, selbst weniger als die Größe eines Atoms ganz unmerklich. Das ganze magnetische Feld, auf dem seine Trägheit beruht, liegt in unmittelbarer Nähe des Elektrons; gerade diese äußerst geringe Größe ist es, die eine solche Konzentration ermöglicht, und selbst in einem Quecksilberatom, in dem die Elektronen dicht zusammengedrängt sind, greift das Feld eines Elektrons nicht in die Felder der benachbarten Elektronen ein. Sie sind alle voneinander unabhängig, jedes mit seiner eignen Trägheit fast isoliert von den anderen; denn wenn es nicht so wäre, so würde die Masse eines Körpers in inniger chemischer Verbindung nicht konstant bleiben, sondern kleiner werden. Ob sie wirklich kleiner wird, ist eine Frage, die untersucht zu werden verdient.[1]) Minimale Effekte in dieser Richtung sind von Heydweiller und von Landolt beobachtet worden, aber die Beobachtungen sind nicht entscheidend.

Die Bewegungsgröße einer bewegten Ladung bei gewöhnlichen Geschwindigkeiten ist, wie im 2. Kapitel gezeigt worden ist, dem Radius der Kugel, die sie enthält, umgekehrt proportional, aber die Lokalisierung dieser Bewegungsgröße, die wir jetzt betrachten, kann man sich annähernd in folgender Weise vorstellen.

Die Bewegungsgröße hängt von der Koexistenz und dem Produkt der beiden Felder, des elektrischen und des magnetischen, ab. Jedes Feld ist dem Quadrat der Entfernung von der bewegten Ladung umgekehrt proportional; und ihr Vektorprodukt steht, was die Richtung betrifft, in jedem Punkt auf dem Radius vector senkrecht. Bei gewöhnlichen Geschwindigkeiten ist es dem Sinus des Winkels zwischen dem Radius vector und der Bewegungsrichtung proportional, und was die Größe betrifft, so

1) Rayleigh, British Association, Belfast 1902.

nimmt es im umgekehrten Verhältnis der vierten Potenz der Entfernung ab. Dies alles kann man sich leicht vorstellen.

Man denke sich jetzt ein bewegtes Elektron und betrachte die Verteilung seiner Bewegungsgröße in dem umgebenden Raum. Zwischen seiner Oberfläche und einem Raum vom Hundertfachen seines Durchmessers sind 99 Prozent seiner Bewegungsgröße enthalten; denn um sie zu berechnen, müßten wir den Faktor

$$\int_a^r \frac{4\,\pi\,r^2\,dr}{r^4}$$

integrieren.

Das Hundertfache des Durchmessers eines Elektrons ist aber nur 10^{-11} Zentimeter, d. h. gleich dem tausendsten Teil des Durchmessers eines Atoms. Innerhalb der Grenzen eines Atoms, dessen Durchmesser das Hunderttausendfache vom Durchmesser eines Elektrons ist, muß also so gut wie alle Bewegungsgröße eingeschlossen sein.

Selbst in einem Atom, in welchem die Elektronen dicht zusammengedrängt sind, z. B. in einem Platinatom oder einem Quecksilberatom, greifen die Bewegungsgrößen der einzelnen Bestandteile nur sehr wenig ineinander ein, da ihre mittlere Entfernung voneinander mehrere tausendmal der Durchmesser des einzelnen Elektrons ist.

Infolgedessen stehen die Behauptungen, daß ein elektrischer Strom ein Transport von Elektronen ist, und daß die Energie eines Stromes sich in dem Raum fortpflanzt, der die bewegte Elektrizität umgibt, nicht miteinander in Widerspruch. Ebensowenig widersprechen sich die Behauptungen, daß die Masse eines Körpers ihren Sitz in den Atomen hat, und daß Trägheit oder Bewegungsgröße eine Eigenschaft ist, die von der Selbstinduktion des elektromagnetischen Feldes herrührt, welches einen bewegten elektrischen Kern umgibt.

Dasselbe kann über die Art und Weise gesagt werden, wie ein Strom fortgepflanzt wird. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Elektronen durch einen festen Körper mag beträchtlich sein (s. nächsten Abschnitt), aber sie bleibt weit hinter der Geschwindigkeit zurück, mit der sich ein telegraphisches Signal den Draht

entlang fortpflanzt. Sie müssen durch eine seitliche Wirkung in dem umgebenden Isolator, die durch den Äther mit der Lichtgeschwindigkeit übertragen wird, fortgetrieben werden, und zwar durch eine Vorrichtung, die in den „Modern Views" in der Form von Zahnrädern symbolisiert wurde; sie können nicht durch einen Enddruck in Bewegung gesetzt werden. Der elektrische Strom ist etwas mehr materielles oder hat ein mehr materielles Ansehen, als man bis vor kurzem glaubte; aber alles was über die Art seiner Fortbewegung und die Diffusion der treibenden Kraft von außen nach innen durch die aufeinander folgenden Schichten des Drahtes gelehrt wurde, auf denen die Energie von einem Punkt des Leiters zum anderen übergeht, um hier in Wärme verwandelt zu werden, dies alles bleibt richtig.

Anzahl der Ionen in Leitern.

Welche ungeheure Anzahl von Elektronen erforderlich ist, um die Masse eines Stückes Platin oder ein Stück Materie wie die Erde zu bilden, kann man sich leicht denken. Ebenso kann man sich leicht vorstellen, daß eine ungeheure Anzahl in Bewegung gesetzt werden muß, um Ströme von gewöhnlicher Stärke zu erzeugen, wie solche, die leicht durch Flüssigkeiten gehen können.

In Gasen erreicht die Anzahl der Elektronen bald eine Grenze und infolgedessen nimmt das Leitungsvermögen eines ionisierten Gases ab, wenn wir einen Strom von bestimmter Stärke, den sogenannten Sättigungsstrom, noch zu verstärken suchen. Man vergleiche die im 7. Kapitel kurz erwähnten Untersuchungen von Townsend und anderen. Meines Wissens liegen keine Beobachtungen vor, die für das Vorhandensein einer solchen Grenze in festen oder flüssigen Körpern sprechen.

Über die Geschwindigkeit, mit der sich die Elektronen in festen Körpern bewegen, ist nichts bekannt, aber man vermutet, daß sie sehr groß ist; Betrachtungen über die Zentrifugalkraft führen zu dem Schluß, daß die Geschwindigkeit eines jeden Elektrons während des Zusammentreffens mit einem Atom gleich $e\sqrt{K\,mr}$ oder ungefähr 10^8 Zentimeter pro Sekunde ist; und aus Betrachtungen, die sich auf Maxwells Satz von der gleichen Ver-

teilung der Energie unter die Teilchen gemischter Gase stützen, ergibt sich für die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen bei gewöhnlichen Temperaturen in einem festen Körper, in dem sie frei sind, 10^7 cm, d. h. hundert Kilometer oder sechzig Meilen pro Sekunde; dies ist jedoch keineswegs die Geschwindigkeit einer in gerader Linie *fortschreitenden* Bewegung, weil jedes Teilchen fortwährend Änderungen der Richtung erleidet. In Flüssigkeiten dagegen sind sie mit Atomen verbunden und die Geschwindigkeit, mit der sie sich bewegen, ist sowohl theoretisch als experimentell ziemlich genau ermittelt worden; sie ist für gewöhnliche Potentialgradienten ungefähr ein Zoll pro Stunde.

Der gesamte Strom ist gleich neu; und wir können die Anzahl der Ionen berechnen, welche bei einer so geringen Geschwindigkeit erforderlich sind, um einen C. G. S.-Einheitsstrom zu erzeugen. Denn e ist gleich 10^{-20} elektromagnetischen Einheiten; wenn wir also $u = 10^{-3}$ Zentimeter pro Sekunde setzen, so ist die Anzahl der Ionen, die beim Transport der C. G. S.-Einheit von 10 Ampère beteiligt sind, $n = 10^{23}$. Dies ist nicht viel; es ist ungefähr die Anzahl der Atome in einem Kubikzentimeter Flüssigkeit. Durch Anwendung eines höheren Potentialgradienten kann eine größere Geschwindigkeit der Ionen erzeugt werden. Man könnte denken, es müsse möglich sein, durch Verengerung des Querschnitts eines flüssigen Leiters unter einem gegebenen Potentialgradienten eine Sättigungstromdichte zu erreichen. Die beobachtete Giltigkeit des Ohmschen Gesetzes[1]) unter solchen Umständen widerspricht jedoch dieser Möglichkeit.

Schluß.

Hiermit ist der Gegenstand keineswegs erschöpft, allein ich muß es mir versagen, ihn noch weiter zu verfolgen. Der interessanteste Teil des Ganzen ist die Erklärung der Materie durch die Elektrizität, die Annahme, daß die Elektrizität die Grundsubstanz ist und daß das, was wir als ein unteilbares Atom Materie zu betrachten gewohnt sind, aus ihr aufgebaut ist; daß alle Atome, die Atome aller verschiedenen Substanzen, aus demselben Material aufgebaut sind. So führt die physikalische Forschung das

1) Fitz Gerald und Trouton, *Brit. Assoc. Reports,* 1886, 1887, 1888.

alte Problem der *Einheit der Materie* seiner Lösung entgegen. Die Theorie kann jedoch bis jetzt noch nicht als vollständig erwiesen gelten. Es bleibt noch viel zu tun übrig, bevor wir mit Bestimmtheit annehmen können, daß die Masse von elektrischen Kernen herrührt. Dann kommen wir aber zugleich zu einem anderen überraschenden Resultat, nämlich daß die Zwischenräume innerhalb eines Atoms ungeheuer groß sind im Vergleich mit der Größe der elektrischen Kerne, aus denen das Atom besteht; so daß ein Atom als eine Art kompliziertes astronomisches System wie der Saturnring oder ein Nebel betrachtet werden kann, d. h. als ein System ohne Sonne, aber mit einer großen Anzahl gleicher Körper, welche Trägheit besitzen und die unter der Einwirkung elektrischer Anziehungs- und Abstoßungskräfte stehen, welche die Gravitation ersetzen. Die Strahlung eines Nebels kann in ähnlicher Weise wie die X-Strahlung mancher Atome von Erschütterungen und Kollisionen herrühren.

Ein Atom ist im Vergleich mit einem Elektron größer als die Sonne im Vergleich mit der Erde. Wenn wir ein Elektron durch einen Punkt von einem hundertstel Zoll Durchmesser darstellen, also durch einen Punkt von der Größe der Punkte in dem vorliegenden Druck, so ist der Raum, in welchem sich einige Hundert oder Tausend Elektronen, die ein Atom bilden, bewegen, einem Würfel von 100 Fuß Kante vergleichbar; mit anderen Worten, ein Atom würde in demselben Maßstab durch eine Kirche von 160 Fuß Länge, 80 Fuß Breite und 40 Fuß Höhe repräsentiert werden. Die Elektronen verlieren sich geradezu in diesem Raum, und doch gehören sie nach der elektrischen Theorie der Materie alle zu dem Atom, welches sich hier befindet. Sie „okkupieren" das Volum des Atoms in demselben Sinne wie Soldaten ein Gebiet okkupieren; sie sind in hohem Grade energievoll, aber nicht umfangreich; und in ihren gegenseitigen Beziehungen bilden sie das, was wir ein Atom Materie nennen; sie geben ihm seine Trägheit; sie befähigen es, sich an andere, die in unmittelbare Nähe kommen, mit einer Kraft, die wir Kohäsion nennen, anzuklammern; und bei Überschuß oder Mangel eines oder mehrerer Bestandteile zeigen sie chemische Eigenschaften und vereinigen sich heftig mit anderen, die sich in demselben oder vielmehr im entgegengesetzten Zustand befinden.

Daß sich ein solches hypothetisches Atom, welches nur aus zerstreuten Punkten besteht, ohne Widerstand durch den Äther bewegen kann, ist nicht überraschend. Sie können sich miteinander, aber, solange ihre Geschwindigkeit konstant ist, nicht mit dem Äther verbinden; wenn sie ihn überhaupt stören, so geschieht es wahrscheinlich nur in der einfachsten, nicht mit Rotation verbundenen Weise, die durch optische Mittel nicht entdeckt werden kann.[1]) Auch streben sie ihn nicht mitzuschleppen. Alle bekannten Linien mechanischer Kraft gehen von einem Atom zum anderen; sie endigen niemals im Äther, ausgenommen in einer fortschreitenden Wellenfront. In einer Wellenfront findet sich der eine Teil eines mechanischen Strahlungsdruckes, dessen anderer Teil auf die Quelle wirkt. Dies ist ein interessanter, aber wesentlich nichtstatischer Fall, der nicht zur Sache gehört.

Über die Natur des Elektrons als einer Erscheinung im Äther kann man sich einstweilen keine bestimmte Meinung bilden. Es ist bis jetzt noch unklar, weshalb eine positive Ladung so fest mit einer Masse verbunden ist, während ein überschüssiges Elektron leicht entweicht und sich im isolierten Zustand bewegt. Ebenso ist die Natur der Gravitation noch nicht aufgeklärt. Wenn die Elektronentheorie bis zur zweiten Ordnung oder einer höheren *geraden* Ordnung kleiner Größen vollständig ist — sie ist jetzt bis zur zweiten Ordnung vollständig, wenn die Elektronen als geometrische Punkte behandelt werden können — so wird hoffentlich auch die Gravitation einen Teil der Theorie bilden. Augenblicklich ist sie eine empirische Tatsache, die wir beobachten, ohne sie zu verstehen. In dieser mißlichen Lage haben wir uns nicht nur seit der Zeit Newtons, sondern jahrhundertelang vorher befunden; nur kannten wir vor Newton nicht die wichtige Rolle, welche sie im Weltall spielt.

Bisher hat man die Aufmerksamkeit hauptsächlich auf den frei beweglichen negativen Bestandteil konzentriert — die trägeren positiven Ladungen sind zunächst von geringerem Interesse — aber das Verhalten der Elektronen kann nicht vollständig verstanden werden, ohne daß auch die Natur und die Eigenschaften des positiven Bestandteils verstanden wird. Nach Larmor muß die positive

1) Siehe Lodge, *Phil. Trans.*, vol. 184, pp. 750—754; vol. 189, p. 166.

Ladung in ihrer wesentlichen Konstitution das Spiegelbild der negativen Ladung sein.

Das positive Elektron ist meines Wissens bis jetzt nicht im freien Zustand beobachtet worden. Einige nehmen an, daß es im freien Zustand nicht existieren kann, daß es tatsächlich der Rest des Atoms Materie ist, dem die negative Einheitsladung entzogen worden ist; mit anderen Worten, daß „Elektrizität" von „Elektrizität" und „Materie" von „Materie" abgestoßen wird, daß aber Elektrizität und Materie in Verbindung eine neutrale Substanz darstellen, die das Atom Materie bilden, so wie wir es kennen. Dieser Satz bildet eine merkwürdige und auffallende Rückkehr zu den Ansichten, die von dem genialen Benjamin Franklin ausgesprochen wurden. Diese Ansichten sind unter jeder Hypothese von außerordentlichem Interesse und lassen uns wieder den prophetischen Blick erkennen, auf den wir schon bei anderen Entdeckern hinzuweisen Gelegenheit hatten (4. Kapitel und Anhang H). Wir stehen gegenwärtig Franklins Ansichten ohne Zweifel näher, als man jemals von seiner Zeit an bis heute gestanden hat.

Daß ein Atom aus einer gewissen Anzahl abwechselnd positiver und negativer oder umeinander rotierender Elektronen besteht, ist nicht die Ansicht Franklins; sie ist auch jetzt weiter nichts als eine Vermutung. Wenn sie mehr werden soll, so muß die Existenz der positiven Ladung experimentell festgestellt und, wenn dies gelingt, die Natur dieser Ladung untersucht werden.

Namentlich muß ermittelt werden, wie die positive und die negative Ladung im Äther aufzufassen sind, ob vielleicht als entgegengesetzte Spannungen in einem Kelvinschen gyrostatisch stabilen Äther, wie Larmor[1]) annimmt, oder in einer anderen bis jetzt unbekannten Weise. Zur Aufklärung dieser Frage werden aber umfangreiche und höchst schwierige mathematische Untersuchungen erforderlich sein.

---

1) Siehe *Ether and Matter,* p. 326; oder *Phil. Trans.* 1894, pp. 810, 811, und 1897, pp. 209—212.

Anhänge.

Anhang A.

Berechnung der Trägheit einer elektrischen Ladung.

Man denke sich, ein kugelförmiger Konduktor vom Radius a, der eine Ladung Elektrizität besitzt, bewege sich mit einer mäßigen Geschwindigkeit u; dabei ist jede Geschwindigkeit als mäßig anzusehen, die merklich kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit; er bildet ein Stromelement von der Größe eu, und sein Strom ist durch Verschiebungsströme im umgebenden Dielektrikum geschlossen. Denn vorn entstehen und hinten verschwinden elektrische Kraftlinien in dem Medium, und so findet eine Verschiebung der Elektrizität von vorn nach hinten statt, durch welche die Vorwärtsbewegung kompensiert wird; und die Verschiebungslinien sind identisch mit den magnetischen Linien, die durch einen kurzen Magnet erzeugt werden. Man kann sagen, eine Ladung bewege sich und nehme ihre elektrostatischen Linien mit, oder man kann sagen, die Ladung erzeuge fortwährend vorn ein elektrostatisches Feld und zerstöre ein solches hinten.

Wenn sich also ein elektrisches Feld, teilweise seitlich, bewegt, so erzeugt es ein magnetisches Feld, im vorliegenden Falle in kreisförmigen Linien um die Bewegungslinie; denn die bewegte Ladung ist ein Element eines linearen Stromes. Die so entstehenden magnetischen Linien wirken so, daß sie den Strom, der sie erzeugte, schwächen; solange sie konstant sind, üben sie allerdings keine Wirkung aus. Wenn sie dagegen verschwinden, so streben sie den Strom, der sie erzeugte, fortdauern zu lassen. Wenn daher die Bewegung der Ladung oder der Strom aufzuhören strebt, so stößt die Verzögerung auf ein Hindernis; der Strom wird gezwungen weiter zu bestehen, weil das Magnetfeld abnimmt, welches ihn erregte. Die Geschwindigkeit wird nicht beeinflußt, aber die positive oder negative Beschleunigung wird gehemmt, denn es handelt sich nicht um eine der Reibung, sondern um eine der Trägheit vergleichbare Wirkung.

Die Ladung verhält sich also so, als ob sie Trägheit hätte, und den Betrag dieser Trägheit können wir in folgender Weise berechnen.

Während sich die Ladung bewegt, bildet sie einen Strom, der von Ringen magnetischer Kraft umgeben ist, deren Intenstiät in einem beliebigen Punkt durch den gewöhnlichen Ausdruck

$$H = \frac{e\,u \sin \vartheta}{r^2}$$

gegeben ist, wenn r und ϑ die Polarkoordinaten in bezug auf die Bewegungslinie als Achse und die Ladung als Ursprung sind und das Stromelement durch $e\,u$ anstatt durch $C\,ds$ bezeichnet wird.

Der gewöhnliche Ausdruck für die elektrostatische Kraft in demselben Punkt ist

$$E = \frac{e}{\varkappa\, r^2}$$

(wegen des Faktors $\varkappa$ vergleiche man die Anmerkung am Ende vom 1. Kapitel) und wenn die Bewegung langsam ist, so bleibt dieser Wert unverändert; wenn sie aber sehr schnell ist, so wird das elektrische Feld die Achse entlang schwächer und äquatorial stärker, und zwar ist es, wie Heaviside (*Philosophical Magazine*, April 1889) gezeigt hat, durch den folgenden Ausdruck gegeben:

$$E = \frac{e}{\varkappa\, r^2} \cdot \frac{1 - (u/v)^2}{\left\{1 - (u \sin \vartheta/v)^2\right\}^{3/2}},$$

in welchem v die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die Stärke des Magnetfeldes wird in diesem Falle in ähnlicher Weise modifiziert. Man drückt sie am einfachsten durch E aus; dann ist sie nämlich *immer*

$$H = \varkappa\, E\, u \sin \vartheta.$$

Das Maß für die Energieübertragung ist das Vektorprodukt von E und H; und die gesamte magnetische Energie — d. h. die gesamte vom Strom, also von der Bewegung herrührende kinetische Energie — erhält man, wenn man den gewöhnlichen Ausdruck $\mu\, H^2/8\pi$ über den ganzen Raum außerhalb der geladenen Kugel, d. h. von a bis ∞ integriert. Es wird angenommen, daß die Ladung ihren Sitz auf der Oberfläche hat, so daß innerhalb der Kugel keine Energie ist. Im allgemeinen Fall ist dieser Ausdruck etwas lang, aber in dem wichtigsten Fall, wenn die Geschwindigkeit der Bewegung u erheblich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit v ist, ist der Ausdruck selbst sowie seine Ableitung sehr einfach:

Kinetische Energie

$$= \int_a^\infty \frac{\mu\, H^2}{8\pi}\, d\,(\text{vol.}) = \frac{\mu\, e^2\, u^2}{8\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \int_a^\infty \frac{\sin^2 \vartheta}{r^4}\, dr \,.\, r\, d\vartheta \,.\, r \sin \vartheta\, d\varphi$$

$$= \frac{\mu\, e^2\, u^2}{8} \int_0^{2\pi} \int_a^\infty \frac{\cos^2 \vartheta - 1}{r^2}\, dr \,.\, d \cos \vartheta = \frac{\mu\, e^2\, u^2}{3\, a}.$$

Vergleicht man dies mit mechanischer kinetischer Energie, $\frac{1}{2} m u^2$, so sieht man, daß die Ladung auf der Kugel dieser weitere kinetische Energie erteilt, als ob ihre Masse um den Betrag

$$m = \frac{2 \mu e^2}{3 a}$$

vergrößert würde.

Dieser Ausdruck kann auch in folgender Weise geschrieben werden:

$$m = \frac{2 \mu \varkappa \cdot e^2}{3 \quad \varkappa a} = \frac{2}{3 v^2} \cdot e \cdot \frac{e}{\varkappa a} = \frac{2}{3 v^2} \times \text{Ladung} \times \text{Potential},$$

oder $\frac{3}{4} m v^2 =$ elektrostatische Energie der Ladung; dabei wird eine Kugelschale Elektrizität vorausgesetzt. Mit anderen Worten, die der Ladung äquivalente Masse ist eine solche, daß, wenn sie ein Stück Materie mit konstanter Trägheit wäre, das sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, ihre kinetische Energie anderthalbmal so groß sein würde wie die potentielle Energie der elektrischen Ladung im ruhenden Zustand.

Anhang B.

Das durch einen bewegten Magnet erzeugte elektrische Feld.

Ein kurzer Stabmagnet oder eine gleichförmig magnetisierte Kugel (ihr Moment M ist die Intensität der Magnetisierung × Volum der Kugel), die sich achsial, d. h. in der Richtung der Magnetisierung, mit der Geschwindigkeit u bewegt, erzeugt kreisförmige Linien elektrischer Kraft, deren Mittelpunkte auf der Achse liegen, ebenso wie eine bewegte Ladung kreisförmige Linien magnetischer Kraft erzeugt. Ist einer solchen Kraftlinie entlang ein Leiter vorhanden, so erzeugt die Bewegung eines Magnets in der Richtung seiner Achse einen Strom in demselben; in Abwesenheit eines Leiters dagegen bewirkt die Bewegung nur eine elektrische Verschiebung, welche verschwindet, sobald die Bewegung aufhört.

Die Intensität des Magnetfeldes in einem Punkt seiner Achse ist bekanntlich $2 M/r^3$; in einem Punkt seiner Äquatorialebene ist sie $- M/r^3$; und in jeder anderen Richtung ist sie, was allein die Größe betrifft,

$$H = \frac{M}{r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \vartheta}.$$

Dies alles gilt sowohl für den bewegten als auch für den ruhenden Magnet, vorausgesetzt, daß seine Geschwindigkeit sich nicht der Lichtgeschwindigkeit nähert.

Die elektrische Kraft in demselben Punkt ist

$$E = \frac{3\,M\,u}{2\,r^3}\sin 2\,\vartheta$$

$$= 3\,H\,u\,\frac{\sin\vartheta}{\sqrt{4+\tan^2\vartheta}}.$$

Die resultierende elektrostatische Energie ist das Integral von $\varkappa E^2/8\pi$ über den ganzen Raum außerhalb der bewegten magnetisierten Kugel vom Radius a, d. h.

$$\text{Energie} = \frac{\varkappa}{8\pi}\int\int\int\left(\frac{3\,M\,u}{r^3}\right)^2 \sin^2\vartheta\cos^2\vartheta\,dr\,.\,r\,d\vartheta\,.\,r\sin\vartheta\,d\varphi$$

$$= \frac{\varkappa M^2 u^2}{5\,a^3} = \frac{M^2}{5\,\mu\,a^3}\left(\frac{u}{v}\right)^2.$$

Die Verschiebung wirkt wie eine elastische Deformation im Dielektrikum, welche die obige Energie statisch aufspeichert; und solange sich der Magnet mit konstanter Geschwindigkeit bewegt, übt die elektrische Verschiebung keine Kraft auf ihn aus. Beschleunigung dagegen stößt auf Widerstand; denn wenn der Magnet anfängt sich schneller zu bewegen, so vermehrt er die Verschiebung, d. h. es entsteht ein vorübergehender Strom, welcher der Bewegung entgegenwirkt, solange die Beschleunigung dauert, der aber aufhört, sobald die Bewegung wieder gleichförmig wird.

Wenn dagegen die Bewegung des Magnets anfinge nachzulassen, so würde die elektrische Deformation anfangen zu verschwinden und dies Verschwinden würde einen entgegengesetzten vorübergehenden Strom bilden, der die Bewegung unterstützen, d. h. dem Nachlassen entgegenwirken würde. Mit anderen Worten, die Schwankungen der kreisförmigen elektrischen Deformation in dem umgebenden Medium erteilen einem bewegten Magnet eine falsche oder scheinbare Bewegungsgröße, die zu seiner wirklichen mechanischen Bewegungsgröße hinzukommt, und man kann also sagen, daß die elastische Deformation selbst eine falsche oder scheinbare Trägheit repräsentiert, die von der Magnetisierung herrührt und die zu der wirklichen mechanischen Trägheit hinzukommt, die der Körper, welcher den Magnetismus enthält, besitzen kann. Und der Betrag dieser Extraträgheit ist

$$m = \frac{2\,\varkappa M^2}{5\,a^3} = \frac{2\,M^2}{5\,\mu\,a^3 v^2} = \frac{8}{15}\cdot\frac{\pi\,I\,M}{\mu\,v^2} = \frac{2}{5}\,\frac{H_0\,M}{v^2},$$

wenn I die Intensität der Magnetisierung ist und H_0 die Intensität des Feldes in der Substanz einer gleichförmig magnetisierten Kugel vom Radius a und dem magnetischen Moment M.

Die Energie der äquivalenten Masse, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt, würde also gleich zwei Fünftel der wahren Energie der magnetisierten Kugel sein.

Anhang C.

Über Elektrizität, Gravitation und Dimensionen.

In einem Artikel des Verfassers im *Philosophical Magazine* für November 1882, p. 358 ist die fundamentale und notwendige Beziehung zwischen Konstanten in folgender Weise angegeben:

$$e^2/\varkappa \equiv M^2/\mu \equiv \gamma m^2 = F l^2;$$

M bedeutet einen Magnetpol und γ Cavendishs Gravitationskonstante; F ist Kraft und l Länge.

Wenn es sich nun jetzt herausstellt, daß eine Masse aus elektrischen Ladungen besteht, so könnte es scheinen, als ob e und m Größen derselben Art seien und nur numerisch zusammenhängen; hieraus würde folgen, daß $\varkappa$ und γ von gleicher Art sind. Mit anderen Worten, Faradays Dielektrizitätskonstante würde mit Cavendishs Gravitationskonstante nahe verwandt werden, und *Gewicht* und *Masse* würden auf Elektrizität zurückgeführt werden. Ein solcher Schluß ist aber nicht berechtigt, und es widerspricht nichts der Annahme, daß die beiden Arten von Kraft, die gravitative und die elektrische, auf wesentlich verschiedene Eigenschaften des Äthers beruhen.

Was die Natur der Gravitationskonstanten selbst betrifft, so haben wir

$$\gamma = \frac{F l^2}{m^2} = \frac{l^3}{mt^2} = \frac{v^2}{m/l} = \frac{(\text{Geschwindigkeit})^2}{\text{lineare Dichte}} = \frac{\text{Energie/Masse}}{\text{Masse/Länge}}.$$

Es ist klar, daß die Gravitation, wenn sie in irgend einem Sinne elektrischen Ursprungs ist, eine Störung zweiter oder einer höheren *geraden* Ordnung sein muß, die dem elektrischen Haupteffekt superponiert und unabhängig vom Vorzeichen ist. Sie würde in der Tat von e^4 abhängen. Denn die Gravitationskraft zwischen zwei Elektronen, deren gegenseitiger Abstand r ist, würde sein

$$F_1 = \gamma \frac{m^2}{r^2} = \frac{\gamma}{r^2}\left(\frac{2\mu e^2}{3a}\right)^2.$$

Die elektrische Kraft zwischen denselben beiden Elektronen bei demselben Abstand ist

$$F_2 = \frac{e^2}{\varkappa r^2}.$$

Folglich ist das Verhältnis zwischen der Gravitation und der elektrischen Kraft für jeden Abstand konstant und gleich

$$\frac{F_1}{P_2} = \frac{4\mu^2 \varkappa \gamma}{9a^2} e^2 = \frac{4\mu\gamma e^2}{9a^2 v^2} = \frac{2\gamma}{v^4} \cdot F_0,$$

wenn F_0 die elektrische Kraft zwischen zwei sich berührenden kugelförmigen Elektronen und v die Lichtgeschwindigkeit ist.

Numerisch ist dieses Verhältnis der beiden Kräfte

$$\frac{F_1}{F_2} = \varkappa\gamma\left(\frac{m}{e}\right)^2 = \frac{1}{9\times10^{20}\times1{,}5\times10^{7}}\left(\frac{1}{10^{7}}\right)^2 = 10^{-42};$$

die elektrische Kraft übertrifft also die gravitative in demselben Verhältnis wie die Erdkugel in Größe ein ultramikroskopisches Objekt.

Bei einer Anhäufung von Elektronen von entgegengesetztem Vorzeichen verschwindet die elektrische Fernwirkung, aber ihr gravitatives Potential ist proportional der Summe der Quadrate der Ladungen. So ist bei 10^{21} gemischten Elektronen in jedem von zwei Körpern für jede Entfernung die Gravitationskraft zwischen ihnen gleich der elektrischen Kraft zwischen zwei einzelnen Elektronen in derselben gegenseitigen Entfernung.

In meinem 1885 der British Association erstatteten Bericht über Elektrolyse findet sich auf S. 745 der folgende Satz: Wenn die entgegengesetzten Elektrizitäten, die in einem Milligramm Wasser enthalten sind, auf zwei Kugeln übertragen würden, die eine Meile voneinander entfernt sind, so würden sich diese beiden Kugeln mit einer Kraft gleich dem Gewicht von 12 Tonnen anziehen.

Anhang D.

Dimensionen des Verhältnisses e/m.

Der reziproke Wert des elektrochemischen Äquivalents einer Substanz, e/m, kann, was die Dimensionen betrifft, in verschiedener Weise ausgedrückt werden; nach *einer* Auffassung ist es ein gewisses hohes Vielfaches von $\sqrt{\varkappa\gamma}$, dem geometrischen Mittel zwischen Faradays Dielektrizitätskonstante und Cavendishs Gravitationskonstante. Dieses numerische Vielfache ist für Wasserstoff von der Ordnung 10^{18}, für Silber 10^{16}.

Nach einer anderen Auffassung ist

$$e^2 = \varkappa F l^2 = \frac{n l}{\mu},$$

woraus folgt

$$\frac{m}{e} = \frac{\mu e}{l} = \sqrt{\frac{\mu m}{l}};$$

also kann e/m ausgedrückt werden durch

$$\sqrt{\frac{\text{Centimeter}}{\mu\ \text{Gramm}}}.$$

Das Künstliche in diesen Dimensionen rührt von der Tatsache her, daß e und m konventionell in verschiedener Weise gemessen worden sind; m wird durch das Verhältnis einer äußeren Kraft zur Beschleunigung

gemessen, e dagegen durch die abstoßende Kraft, die es auf eine gleiche Ladung aus einer gegebenen Entfernung ausübt.

Wenn wir μ als eine Dichte ausdrücken (siehe „Modern Views of Electricity", Anhang p), so wird das elektrochemische Äquivalent ausdrückbar in Gramm pro Quadratzentimeter, d. h. als Oberflächendichte.

Es ist bemerkenswert, daß, während $\sqrt{\varkappa\mu}$ von derselben Dimension wie $1/v$ ist, $\sqrt{\varkappa\gamma}$ in der Dimension mit $1/\varepsilon$ übereinstimmt, wenn ε das elektrochemische Äquivalent bedeutet.

Anhang E.

Elektrische Sättigung usw.

In meinem 1885 der Britisch Association erstatteten Bericht über Elektrolyse (s. den Bericht über die Versammlung in Aberdeen, pp. 762, 763) habe ich auf die Möglichkeit hingewiesen, daß nach einer atomistischen Theorie der Elektrizität für die Ladung einer gegebenen Oberfläche ein Maximum existieren müsse. Das Maximum der Oberflächendichte würde erreicht werden, wenn jedes Atom so polarisiert ist, daß seine Atomladung nach außen gekehrt ist; und für einen festen oder flüssigen Körper würde es einen sehr hohen Wert haben. Da nämlich die Ladung jedes Atoms gleich 10^{-10} und die Anzahl der Atome pro Quadratzentimeter gleich 10^{16} ist, so ist das mögliche Maximum der Oberflächendichte $\sigma = 10^6$ elektrostatische Einheiten pro Quadratzentimeter. Der entsprechende Potentialgradient würde $4\pi\sigma = 10^7$ oder 3000 Megavolt pro Zentimeter und die entsprechende Spannung $2\pi\sigma^2 = 6 \times 10^{12}$ C. G. S. = 40 000 Tonnen pro Quadratzoll sein. Natürlich würde kein Dielektrikum, vielleicht aber ein absolutes Vakuum diesen Druck aushalten.

Wenn also eine Oberfläche stark geladen ist, so kann nur ein äußerst kleiner Bruchteil der Moleküle so polarisiert sein, daß ihre Ladungen nach außen gekehrt sind. Die gewöhnliche Luft z. B. wird durchschlagen, wenn die Spannung den Wert $2\pi\sigma^2 = {}^1/_2$ Gramm pro Quadratzentimeter = 400 C. G. S. erreicht; also ist in gewöhnlicher Luft das Maximum σ gleich 8 elektrostatischen Einheiten pro Quadratzentimeter; dieser Wert würde aber erreicht werden, wenn 10^{11} Moleküle, d. h. eines von je hunderttausend einer festen Oberfläche oder ungefähr ein zehntel Prozent derjenigen der Luft nach außen gekehrt wären.

In dem erwähnten Bericht über Elektrolyse ist auf S. 760 gezeigt worden, daß ein Potentialgradient von der Ordnung 1 Volt für die Entfernung der Moleküle hinreicht, in Flüssigkeiten die Anziehung der Atome zu überwinden und Zersetzung zu bewirken. In einer Flüssigkeit, die ein Leiter ist, erstreckt sich die Wirkung einer Kraft auf eine die Elektrode berührende Schicht von Molekülen, und daher ist in einer solchen Flüssigkeit zwischen den Elektroden eine Potentialdifferenz von ein bis zwei Volt erforderlich und hinreichend, um Zersetzung zu bewirken.

Anhang F.

Gestalt der Bahn eines strahlenden Elektrons.

Man denke sich zwei Elektronen von entgegengesetztem Vorzeichen, die sich mit der Frequenz der Lichtschwingung n in der gegenseitigen Entfernung r umeinander bewegen; oder besser, man denke sich ein freies negatives Elektron, welches sich um eine verhältnismäßig ruhende gleiche positive Ladung bewegt, die in der Entfernung r mit einem Atom verbunden ist.

Die zwischen denselben wirkende Kraft ist $e^2/\varkappa r^2$, also die Beschleunigung

$$\frac{e^2}{\varkappa r^2} \cdot \frac{3a}{2\mu e^2} = \frac{3av^2}{2r^2}.$$

Die Beschleunigung kann aber auch durch $4\pi^2 n^2 r$ ausgedrückt werden. Also ist

$$r^3 = \frac{3av^2}{8\pi^2 n^2} = \frac{3a\lambda^2}{8\pi^2} = \frac{3 \times 10^{-13}}{80} (6 \times 10^{-5})^2 = 10^{-23}.$$

Dies ist das „dritte Keplersche Gesetz“ und zeigt an, daß die Entfernung, bei der die Frequenz der Lichtschwingung erreicht werden kann, gleich 10^{-8} Zentimeter ist, mit anderen Worten, daß sich das Elektron auf der Oberfläche des Atoms bewegt. Wenn es dem Kraftzentrum näher kommt, ohne in die anziehende Substanz einzudringen, so müßte es sich schneller bewegen; und solche schnelle Schwingungen können unter den inneren paarweise verbundenen Elektronen durch Zusammenstöße oder andere Störungen hervorgerufen werden.

Die obige Berechnung ist namentlich deshalb bemerkenswert, weil sie der Hypothese entspricht, daß die gesamte Masse eines Elektrons elektrisch und nichts von ihr materiell oder unerklärt ist; denn sie zeigt, daß ein reines Elektron fähig ist, sich in molekularen Entfernungen mit der Frequenz der Lichtschwingung zu bewegen.[1]) Das Quadrat der Wellenlänge ist dem Kubus des Radius vector proportional, vorausgesetzt daß die Ebene der Bahn das Kraftzentrum enthält; wenn dies nicht der Fall ist, so kann eine gezwungene Bewegung von kleinerer Amplitude ähnlich der Bewegung eines Kegelpendels stattfinden.

Anhang G.

Das Strahlungsvermögen eines Elektrons, welches sich in geschlossener Bahn bewegt.

Wir wollen jetzt das Strahlungsvermögen eines Elektrons berechnen, welches sich wie oben (Anhang F) in einer geschlossenen Bahn von atomistischen Dimensionen b mit der Frequenz der Lichtbewegung $n = w/2\pi$ bewegt.

1) Siehe Lodge in *The Electrician* für 12. März 1897, vol. 38, p. 644.

Wenn wir die von einem solchen Teilchen herrührende elektrische und magnetische Kraft in irgend einem Punkte des Raumes einzeln betrachten und dann den Poyntingschen Satz über die Energiebewegung in den koexistierenden Feldern anwenden, so erhalten wir für diese Energiebewegung in einem Punkt, dessen Polarkoordinaten, auf das Zentrum und die Achse der Bahn bezogen, r und ϑ sind, den mittleren Wert

$$\frac{\mu}{v} \cdot \frac{1 + \cos^2 \vartheta}{8\pi} \cdot \frac{e^2 b^2 \omega^4}{r^2}.$$

Und wenn wir dies über die Kugel vom Radius r integrieren, so erhalten wir für die gesamte Energiestrahlung pro Sekunde

$$\frac{2 \mu e^2 b^2 \omega^4}{3 v},$$

wofür man auch

$$\frac{m a \dot{u}^2}{v}$$

schreiben kann, wenn a der Radius, m die Masse, $\dot{u}$ die Beschleunigung des umlaufenden Elektrons und v die Lichtgeschwindigkeit ist.

Der Ausdruck für die Energie, welche von einer bewegten Ladung e pro Sekunde in Form von Wellen in den Aether ausgesandt wird, wurde meines Wissens zum erstenmal von Larmor im *Phil. Mag.* vom Dezember 1897, p. 512 und später auch in *Aether and Matter*, p. 227 gegeben, nämlich

$$\frac{2 \mu e^2}{3 v} \dot{u}^2.$$

Dies stimmt mit der obigen Berechnung überein, denn wenn $\dot{u}$ die Beschleunigung ist, so ist $\dot{u} = u^2/b = b\,\omega^2$. Nun kann nach den neuesten Messungen μe^2 gleich 10^{-40} Gramm-Zentimeter gesetzt werden; und in einer kreisförmigen Bahn vom Radius r ist die Beschleunigung

$$\dot{u} = (2\pi n)^2 b = 40\,(5 \times 10^{14})^2\, 10^{-8} = 10^{23} \text{ C. G. S.};$$

also ist das Strahlungsvermögen eines einzelnen Elektrons, welches sich so bewegt,

$$\frac{2 \mu e^2}{3 v} \dot{u}^2 = \frac{2 \times 10^{-40}}{9 \times 10^{10}} \times 10^{46} = 2 \times 10^{-5} \text{ Erg pro Sekunde.}$$

Nun ist aber die gesamte Energie, welche ein umlaufendes Elektron von den linearen Dimensionen a besitzt, nur

$$\frac{\mu e^2}{3 a} u^2 = \frac{\mu e^2}{3 a} (2 \pi n b)^2,$$

nämlich seine kinetische Energie (seine elektrostatische Energie kann es natürlich nicht ausstrahlen), und diese ist gleich

$$\frac{10^{-40}}{3 \times 10^{-13}} (2\pi \times 5 \times 10^{14} \times 10^{-8})^2 = 3 \times 10^{-13} \text{ Erg},$$

da seine Geschwindigkeit 3×10^7 Zentimeter pro Sekunde oder ein Tausendstel der Lichtgeschwindigkeit ist, Wenn also das Elektron von jeder Zufuhr von Energie abgeschnitten wäre, und wenn es seine Geschwindigkeit beibehalten könnte, so würde es seine gesamte kinetische Energie in dem 10^{-8}ten Teil einer Sekunde, d. h. in drei bis vier Millionen Umläufen ausstrahlen. Dies mag als eine sehr große Abkühlungsgeschwindigkeit erscheinen, allein sie ist für ein isoliertes und leuchtendes Atom nicht überraschend; dieses ist ein Hertzscher Vibrator oder Sender von einfachem Typus. Die Anzahl der Umläufe, welche ein Elektron in einer Sekunde machen muß, um Natriumlicht auszustrahlen, ist ungefähr das 8000fache der Anzahl Sekunden, welche seit Christi Geburt verflossen sind.

Das Verhältnis des Strahlungsvermögens eines einzelnen Elektrons zu seiner gesamten kinetischen Energie können wir ausdrücken durch den Bruch

$$\frac{2a}{v}\left(\frac{\dot{u}}{u}\right)^2 = \frac{2a}{v}(2\pi n)^2 = 8\pi^2 n \frac{a}{\lambda} = 70 \text{ Millionen pro Sekunde.}$$

In einem Aggregat zahlreicher Atome ist die Strahlung nicht frei und uneingeschränkt wie diese; aber sie muß immer ungefähr der Frequenz der Lichtschwingung entsprechen und sie ist proportional der vierten Potenz der Frequenz. Bei einer Frequenz, die eine Welle von der zehnfachen Länge einer Lichtwelle aussendet, ist das Strahlungsvermögen eines umlaufenden Elektrons nur ein Tausendstel des oben berechneten Wertes, aber auch so ist sie sehr bedeutend; es muß also irgend eine Kompensation stattfinden oder eine Substanz könnte nicht permanent existieren. Das Kriterium, daß ein Molekül nicht durch Strahlungsverluste zerstört wird, ist in dem oben zitierten Schlußsatz von Larmors Abhandlung im *Phil. Mag.* vom Dezember 1897 gegeben.

Die Strahlung einer symmetrischen Gruppe von Elektronen wurde oben im 19. Kapitel behandelt.

Das Strahlungsvermögen eines durch Zusammenstoß plötzlich angehaltenen Elektrons ist natürlich viel größer als der obige Wert und ist im 9. Kapitel geschätzt worden. Um reichliche Röntgenstrahlen zu bekommen, muß die Strecke, auf der das Elektron angehalten wird, dem Durchmesser des Elektrons vergleichbar sein; dies erklärt daher die äußerst geringe Dicke und das Durchdringungsvermögen des ausgesandten Pulses.

Anhang H.

Faradays prophetische Nomenklatur.

Als Faraday die Drehung der Polarisationsebene entdeckte, die durch ein Magnetfeld bewirkt wird, welches auf dichte Körper wirkt, in denen sich Licht in der Richtung der Kraftlinien fortpflanzt, — die Ent-,

deckung war das Ergebnis gründlicher und einwandfreier Experimentaluntersuchungen, aber die Zeit war für das Verständnis der Tatsache noch nicht reif — bezeichnete er in seinem Enthusiasmus seine Entdeckung als „die Magnetisierung des Lichtes und die Erleuchtung der magnetischen Kraftlinien", eine Bezeichnung, über deren Bedeutung die Zeitgenossen sich lange Zeit den Kopf zerbrochen haben.

Es ist schwer zu sagen, was sich Faraday unter diesen Bezeichnungen gedacht hat; und sie machten jahrelang den Eindruck ungeeigneter Ausdrücke, die darauf hindeuteten, daß der Entdecker selbst keine klare Vorstellung von der Natur seiner Entdeckung hatte.

Es ist nicht wahrscheinlich, daß er sich über den Gegenstand vollkommen klar war, und später würde er vermutlich bereit gewesen sein, die Erscheinung in anderer Weise aufzufassen; nichtsdestoweniger hatte er stets sein Vergnügen an derselben, obwohl sie, wenn sie weiter nichts als eine Drehung der Polarisationsebene war, für viele Mathematiker und Physiker ihr eigenartiges und überraschendes Interesse verloren zu haben schien. Man muß sich aber immer daran erinnern, daß dies Interesse für Lord Kelvin und für Clerk Maxwell niemals erloschen war und daß es die Haupttatsache war, die viele Jahre später Maxwell anregte, die Entwickelung seiner elektromagnetischen Lichttheorie in Angriff zu nehmen.

Wie anders wirken diese Bezeichnungen jetzt auf uns ein! Lassen sie nicht eine außergewöhnliche unbewußte Einsicht erkennen, wie sie sich so oft bei einem großen Entdecker im Enthusiasmus der Entdeckung offenbart? Man bedenke, daß der Halleffekt, der Zeemaneffekt, das Nordlicht und Faradays Drehung der Polarisationsebene sämtlich durch die Elektronentheorie eng miteinander verknüpft werden.

In der Kathodenstrahlenröhre werden die fliegenden Elektronen durch ein auf ihrer Richtung senkrecht stehendes Feld abgelenkt; oder wenn sie die Linien entlang fliegen, so wird ihre Bahn spiralig um diese Linien herum gekrümmt. Im Nordlicht findet dieser Vorgang in riesigem Maßstab in den oberen Luftschichten statt, und die „magnetischen Kraftlinien der Erde werden erleuchtet" durch Elektronen, die von ihnen aufgefangen und geführt werden. Im Halleffekt macht sich derselbe Einfluß bemerklich durch den langsam fortschreitenden Schwarm von Elektronen, die von einem Atom zum nächsten gehen und eine Krümmung der Strombahn bewirken, in der entweder positive oder negative vorherrschen können. Im Zeemaneffekt wirkt dieselbe Ursache auf die umlaufenden und schwingenden Elektronen, die mit einem strahlenden Atom verbunden sind und eine Lichtquelle bilden; wir können daher mit Recht sagen, daß das „Licht magnetisiert ist", denn die Lichtquelle wird direkt magnetisiert und der Effekt wird dem ausgestrahlten Licht mitgeteilt und durch die Spektralanalyse sichtbar gemacht.

Die erste Andeutung dieses magnetischen Einflusses auf das Licht, welcher allen diesen auf den ersten Blick anscheinend verschiedenen Erscheinungen zugrunde liegt, bildet die von Faraday entdeckte geringe

Differentialdrehung der Polarisationsebene, die ein Magnet in der einen oder anderen Richtung bewirkt, je nachdem das positive oder negative Element in der dichten Substanz am meisten beeinflußt wird.

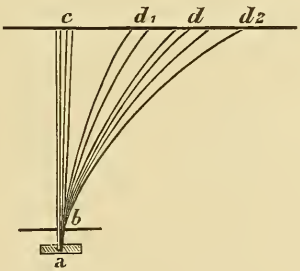
Daher kann die Bezeichnung seiner Entdeckung als „die Erleuchtung der magnetischen Kraftlinien und die Magnetisierung des Lichtes" als ein prophetischer Ausspruch eines genialen Geistes betrachtet werden.

Einen ganz ähnlichen prophetischen Ausspruch, der bereits erwähnt wurde, tat Crookes, als er darauf hinwies, daß die Kathodenstrahlen etwas wie Korpuskularlicht sind und also Materie in einem vierten Aggregatzustand. Denn einerlei ob er vollkommen recht hatte oder nicht, jedenfalls hatte er mehr recht als die Kritiker jener Tage, welche seine Ansichten ins lächerliche zu ziehen suchten.

Anhang I.

Über die β-Strahlen des Radiums. Magnetische Ablenkung der β-Strahlen.

Die beigefügte Figur veranschaulicht die Zerstreuung der β-Strahlen oder der mit verschiedenen Geschwindigkeiten vom Radium ausgesandten Teilchen, welche sie in einem magnetischen Feld erleiden. Einige werden nur wenig abgelenkt, da sie eine sehr große Geschwindigkeit besitzen.



a ist die Strahlungsquelle,

b eine Öffnung, durch welche die Strahlen austreten,

c der Eindruck, der auf der photographischen Platte in Abwesenheit eines Magnetfeldes entstehen würde, und

d_1, *d*, d_2 der Eindruck auf derselben Platte, der durch die abgelenkten Strahlen erzeugt wird.

In einem gleichförmigen magnetischen Feld sind die Strahlen sämtlich Kreisbogen, und es ist leicht, den Krümmungsradius eines Strahls zu bestimmen, der einem bestimmten Punkt des Spektrums entspricht, da durch drei Punkte, z. B. *a*, *b* und *d*, nur *ein* Kreis gelegt werden

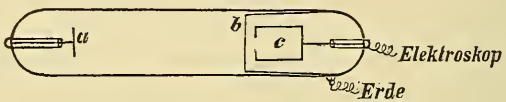
kann; da diese drei Punkte bekannt sind, so ist auch der Kreis, von welchem der Strahl einen Teil bildet, bekannt und sein Krümmungsradius ist daher bestimmt.

Elektrische Ladung der β-Strahlen.

Daß die gewöhnlichen Kathodenstrahlen negativ geladen sind, wurde in überzeugender Weise von Perrin vermittelst des in der folgenden Figur schematisch dargestellten Apparates nachgewiesen. In dieser Figur ist

a die Kathode,

b ein zur Erde abgeleitetes Diaphragma mit kleiner Öffnung, und ein hohles Gefäß, welches die Strahlen auffängt und die Ladung einem Elektroskop zuführt.



Es ist nicht leicht zu beweisen, daß die vom Radius ausgesandten Strahlen geladen sind, weil bei ihrem Auffallen die Luft und alles in der Umgebung leitend gemacht wird, allein Prof. Curie gelang es den Beweis zu erbringen, indem er ein Stück Metall vollständig in festes Paraffin einschloß und zeigte, daß es geladen wurde, wenn es den Strahlen ausgesetzt wurde.

Strutt zeigte in einer einfachen und interessanten Weise den entgegengesetzten Effekt, indem er eine Radiumröhre in einem Vakuum aufhing und an derselben ein Paar Goldblättchen befestigte. Wenn die geladenen Strahlen vom Radium fortgeschleudert werden. so divergieren die Blättchen mit der entgegengesetzten Ladung; sie divergieren immer mehr, bis sie mit der Gefäßwand in Berührung kommen; dann fallen sie zusammen, und das Spiel wiederholt sich so lange als noch Radium vorhanden ist, was viele Jahrhunderte dauern muß.

Strutts Apparat ist in Fig. 22 (S. 159) abgebildet.

Was die Eigenschaften des Radiums betrifft, namentlich auch die wichtigsten Tatsachen, welche nicht die Elektronen, sondern die α-Strahlen, die Emanationen und die Umwandlung der Materie betreffen, so bildet R. J. Strutts Werk *The Becquerel Rays and the Properties of Radium* eine gute und klare elementare Darstellung des Gegenstandes, und das Buch ist als Einleitung zu Rutherfords Werk zu empfehlen.

Anhang K.

Bemerkung über das Verhalten einer Ladung, die sich annähernd mit der Lichtgeschwindigkeit bewegt.

Nach den Untersuchungen von Larmor (*Phil. Trans.*, 1897, pp. 228—9) und von Searle (*Phil. Mag.*, Okt. 1897) erleidet die Verteilung einer La-

dung auf einem bewegten Körper keine Änderung, wenn die Geschwindigkeit sehr groß wird, sondern die Kraftlinien werden nach dem Äquator hin abgelenkt, so daß sie an der Stelle, von der sie ausgehen, nicht mehr senkrecht auf der Oberfläche stehen. Einige Ungewißheit in dieser Hinsicht scheint aus einer Verwechselung zwischen der elektrischen Kraft, die auf eine *bewegte* Ladung wirkt, und der Ätherkraft, die auf eine ruhende Ladung wirken würde, entsprungen zu sein; die erstere muß auf einem vollkommenen Leiter senkrecht stehen, die letztere dagegen nicht. Wir können hierin eine gewisse Analogie mit der Tatsache erkennen, daß in einem bewegten Medium Lichtstrahlen nicht senkrecht auf ihrer Wellenfront stehen.

Es kann, wie ich im Jahr 1902 gezeigt habe, keinem Zweifel unterliegen, daß die Kraftlinien nach dem Äquator hin zurückgebogen sind; dabei nahm ich an, daß diese Ablenkung der Linien zu Folge hat, daß sie, um radial bleiben zu können, näher an den Äquator heranrücken, so daß an den Polen die Ladung verschwindet. Ich nehme an, daß die Kraftlinien dicht an der Kugel radial bleiben müssen; aber wenn die Kugel ihre Gestalt ändert, so muß doch eine unerhebliche Veränderung in der Verteilung der Ladung eintreten, wenn die Geschwindigkeit zunimmt. Während eine ruhende Kugel so wirkt, als ob sich die Ladung im Mittelpunkt befände, verlängert sich, wie Searle berechnet hat, dieser Punkt, wenn die Kugel in Bewegung ist, zu einer gleichförmig geladenen Linie, die in der Mitte der Kugel einen kleinen Teil des Durchmessers bildet; wenn die Geschwindigkeit zunimmt, so nimmt auch die Länge dieser Linie nach und nach zu, bis die Geschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit wird. In diesem Fall ist sie gleich dem Durchmesser der Kugel. Hierbei ist aber keine Rücksicht auf eine Formveränderung der Kugel selbst genommen, auf die ich sofort zurückkommen werde.

Die Sache ist die, daß das Verhalten eines geladenen Körpers, der sich mit riesiger Geschwindigkeit bewegt, nach der elementaren Potentialtheorie genau wie ein ruhendes geladenes Ellipsoid behandelt werden kann.

Es ist zweifelhaft, ob unter diesen Umständen die Bezeichnung „Trägheit“ noch anwendbar ist; es ist vielleicht am besten, sie für den gewöhnlichen Fall zu reservieren, wenn die Masse konstant ist. Man kann nämlich, wie Searle hervorgehoben hat, die Trägheit in drei verschiedenen Arten messen: durch das Verhältnis der Kraft zur Beschleunigung, das Verhältnis der Bewegungsgröße zur Geschwindigkeit und durch das Verhältnis der kinetischen Energie zum halben Quadrat der Geschwindigkeit. Für gewöhnliche Materie und für langsame Bewegung elektrischer Ladungen sind diese drei Messungen identisch, aber für die Bewegung elektrischer Ladungen mit sehr großer Geschwindigkeit werden sie verschieden; der Unterschied ist jedoch äußerst geringfügig und macht sich erst bemerklich, wenn die Lichtgeschwindigkeit annähernd erreicht wird. Daher ist in keinem wirklich beobachteten Fall von großer Geschwindigkeit oder großer Beschleunigung, wie z. B. beim Aufprallen einer Kanonenkugel auf eine Panzerplatte, irgend eine außergewöhnliche

Wirkung zu erwarten, selbst wenn angenommen wird, daß die Materie rein elektrischer Natur ist. Da es aber jetzt möglich geworden ist, durch die Korpuskeln im Vakuum oder die vom Radium ausgesandten Korpuskeln, diese hohen Geschwindigkeiten zu erreichen und entscheidende Bestimmungen mit ihnen auszuführen, ist es notwendig, diese Verhältnisse sorgfältiger zu berücksichtigen. In einer Göttinger Abhandlung vom Januar 1902 hat daher Dr. Abraham einen Unterschied zwischen „longitudinaler" und „transversaler" Trägheit gemacht, indem er die Trägheit nicht nur von der Geschwindigkeit, sondern auch von der Richtung der Beschleunigung abhängig macht, so daß jede Richtung ihre besondere Trägheit hat.

Und dies alles wird noch komplizierter, wenn man den Einfluß der Beschleunigung selbst berücksichtigt, die, wenn sie sehr heftig ist, eine merkliche Strahlung zur Folge hat, die mit Dissipation von Energie verbunden ist; und dieser Energieverlust durch Strahlung macht sich zwar in der Bewegung zunächst als ein Widerstand oder eine Geschwindigkeit bemerklich, kann aber einen sekundären Einfluß auf die Trägheit ausüben, allerdings wahrscheinlich in allen praktischen Fällen einen sehr kleinen und untergeordneten Einfluß und überhaupt gar keinen Einfluß, solange die Bewegung gleichförmig in gerader Linie erfolgt, weil in diesem Fall keine Strahlung stattfindet. Unter diesen Umständen ist es aber nicht möglich, die Trägheit eines Körpers nachzuweisen oder zu messen; nur wenn die Bewegung entweder gekrümmt oder in irgend einer Weise geändert wird, macht sich die Trägheit bemerklich, und dann findet auch notwendigerweise eine wenn auch in den meisten Fällen geringe Strahlung statt.

Wenn die magnetische Ablenkung eines geladenen Körpers bei sehr hohen Geschwindigkeiten beobachtet wird, so fragt es sich, ob vielleicht der gewöhnliche Ausdruck für die von einem bewegten Feld auf einen Strom ausgeübte Kraft aufgegeben werden muß.

Der gewöhnliche Ausdruck für die ablenkende Kraft ist euH bei geringen Geschwindigkeiten, für eine Ladung e, die sich mit der Geschwindigkeit u quer durch ein magnetisches Feld von der Intensität H bewegt; ob aber dieser einfache Ausdruck bei hohen Geschwindigkeiten aufgegeben werden muß, ist eine Frage der Dynamik des Äthers. Das Verfahren von Larmor, welches sich auf das Prinzip der „kleinsten Wirkung" stützt (siehe *Aether and Matter*, p. 97) beantwortet die Frage in verneinendem Sinne, was mit der Ansicht von Lorentz in Einklang steht. Von anderer Seite ist behauptet worden, daß für Geschwindigkeiten, bei denen $(u/v)^2$ merklich wird, für die ablenkende Kraft der folgende etwas kompliziertere Ausdruck benutzt werden muß:

$$e\,\mathrm{H}\,\frac{v^2-u^2}{u}\left(\frac{v}{2u}\log\frac{v+u}{v-u}-1\right).$$

Dieser reduziert sich aber für geringe Geschwindigkeiten nicht auf den gewöhnlichen einfachen Wert, sondern auf ein Drittel dieses Wertes,

$^1/_3$ Heu; und Professor Schuster lenkt im *Philosophical Magazine* vom Januar 1897 die Aufmerksamkeit auf die Verschiedenheit der Zahlenwerte für diese Größe, die man nach verschiedenen Arten der Theorie erhält. Eine wirkliche Zweideutigkeit ist aber, wie es scheint, ausgeschlossen, und die Ansicht Larmors wird als richtig angesehen.

Bei hohen Geschwindigkeiten ändert sich, wie gesagt, nicht nur die Trägheit mit der Geschwindigkeit, sondern sie hat verschiedene Werte für verschiedene *Richtungen* der Beschleunigung in Bezug auf die Bewegungsrichtung. Für die „transversale Trägheit" Abrahams, die eine Reaktion gegen eine transversale ablenkende Kraft bedeutet, gibt Kaufmann in *Comptes Rendus*, vol. CXXXV, p. 577 die folgende Formel:

$$m = \frac{3\,m_0}{4\,\beta^2}\left(\frac{1+\beta^2}{2\,\beta}\log\frac{1+\beta}{1-\beta} - 1\right).$$

In dieser Formel bedeutet m_0 den äquivalenten Faktor für langsame Bewegung und β das Verhältnis u/v, d. h. das Verhältnis der Geschwindigkeit der Teilchen zur Lichtgeschwindigkeit. Diese Formel steht mit den Experimenten Kaufmanns in Einklang. Dies alles ergibt sich ohne weiteres vermittelst der gewöhnlichen Lagrangeschen dynamischen Methode aus dem Ausdruck von Heaviside — *Electrical Papers*, vol. II, p. 514 — für die kinetische Energie, d. h. aus einem Ausdruck bestehend aus $\frac{1}{2}u^2$ multipliziert mit der folgenden Größe:

$$\frac{\mu e^2}{a}\cdot\frac{1-r}{4\,r}\left(1+\frac{2r-\frac{1}{2}}{1-r}+\frac{(2r-\frac{1}{2})\tan^{-1}\sqrt{\frac{r}{1-r}}}{\sqrt{r\,(1-r)^3}}\right);$$

r bedeutet das Quadrat des Verhältnisses der Geschwindigkeiten u^2/v^2.

In Larmors Originalbehandlung über elektrische Trägheit, *Phil. Trans.* 185 A. (August 1894), pp. 806—818, war keine Veranlassung größere Geschwindigkeit als ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit anzunehmen; eine so einfache Theorie der Trägheit schien damals vollkommen hinreichend zu sein, und die Masse war eine permanente Konstante, die mit dem Elektron verbunden war und von seiner Struktur abhing.

Hoffentlich gewinnen wir einen Einblick in die *Struktur*, die durch neuere Versuche über die Modifikation derselben bei hohen Geschwindigkeiten so großes Interesse gewonnen hat.

Professor J. J. Thompsons entsprechende Formel für die Bewegungsgröße ist im Text auf S. 120 angeführt und vereinfacht worden. In der vereinfachten Form mag sie hier wiederholt werden.

Nach dieser Formel ist die Masse einer elektrischen Ladung e auf einer kleinen nichtleitenden Kugel vom Radius a, die sich mit der Geschwindigkeit $u = v \sin\vartheta$ bewegt,

$$m = \frac{\mu e^2}{4\,a\,(1-\cos 2\,\vartheta)}\left\{(1-2\,\cos 2\,\vartheta)\frac{2\,\vartheta}{\sin 2\,\vartheta} + (2-\cos 2\,\vartheta)\right\},$$

was wir auf S. 131 (siehe auch S. 120) in der Form

$$m = \frac{2\mu e^2}{3a}\varphi(\vartheta)$$

tabellarisiert haben, und diese Formel ist bis zu einem gewissen Grade durch Kaufmanns Experimente bestätigt worden. Die Funktion $\varphi(\vartheta)$ ist gleich 1, wenn $u = v$ oder selbst wenn u/v klein ist.

Anhang L.

Deformation infolge sehr schneller Bewegung durch den Äther.

Searle hat im *Philosophical Magazine* vom Oktober 1897 gezeigt, daß der einfachste geladene Körper in Bewegung nicht eine Kugel ist, sondern ein in der Bewegungsrichtung abgeplattetes Sphäroid, dessen Achsen sich verhalten wie $\sqrt{1-\frac{u^2}{v^2}}$, 1, 1; und daß dieses nach außen hin genau dieselbe Wirkung ausübt wie eine in seinem Mittelpunkt befindliche Punktladung. Daher spielt ein solches Sphäroid, wenn es sich mit der Geschwindigkeit u bewegt, die Rolle der Kugel in der Elektrostatik. Searle nennt es ein Heavisidesches Ellipsoid, weil Heaviside zuerst auf die wichtige Rolle hinwies, die es in der Theorie der bewegten Ladungen spielt.

Nun ist aber bekanntlich ein derartiges Sphäroid genau das, was eine in schneller Bewegung befindliche Kugel nach der Fitz Gerald-Lorentzschen Theorie von selbst werden würde, d. h. nach der Hypothese, welche aufgestellt wurde, um die negativen Resultate in Michelsons Experiment zu erklären, dadurch daß man eine Änderung der Dimensionen fester Körper postulierte, je nach der Richtung, in der sie sich durch den Äther bewegen. Diese von Lorentz als annehmbar erklärte Theorie wurde definitiv angenommen, als Larmor zeigte (*Aether and Matter*, 11. Kap.), daß nach der elektrischen Theorie der Materie, d. h. nach der Annahme, daß die gesamte Trägheit der Materie elektrisch ist, eine solche Änderung der Dimensionen nicht nur, wie Fitz Gerald bemerkt hatte, sehr wahrscheinlich und auch hinreichend war, um eine kompensierende Wirkung und eine Nullresultante in Michelsons Experiment zu geben, sondern daß die Änderung eine notwendige Konsequenz der dynamischen Molekulartheorie war.

Diese zunächst nur hypothetisch angenommene Änderung der Dimensionen wird jetzt als eine erwiesene Tatsache angesehen; und es ist interessant, daß eine Kugel in Bewegung, weil sie diesen Betrag von Deformation erleidet, immer noch die Eigenschaft behält, der einfachste geometrische Körper zu sein, soweit es sich um die Verteilung ihres elektrischen Feldes handelt. Sie ist allerdings keine Kugel mehr, aber wahrscheinlich würde kein Meßinstrument imstande sein, die Deformation zu entdecken, weil alle Maße an der Deformation teilnehmen würden. Es ist merkwürdig, daß diese nicht wahrnehmbare und nicht meßbare gleichförmige Deformation aller Materie überhaupt entdeckt worden ist;

sie konnte durch nichts anderes als einen Vorgang im Äther offenbart werden. Nichtsdestoweniger ist sie durch das kombinierte Zeugnis einer elektrischen Theorie und eines optischen Experimentes enthüllt worden.

Anhang M.

Konstitution der Elektronen.

Um die in den Anhängen K und L berührte Frage weiter zu verfolgen, müssen wir uns mit dem Inhalt einer Abhandlung von Larmor (*Phil. Mag.* 190 A, April 1897, pp. 225—8) bekannt machen. In *Aether and Matter* (1898), 9. Kap. gab er eine verbesserte (dynamische) Untersuchung, die auf ein System von Molekülen in der kompliziertesten Bewegung anwendbar ist, und er glaubt alle möglichen Fälle durch die einfache Hypothese zusammenfassen zu können, daß die Elektronen in einem Atom sich in Abständen voneinander befinden, die im Vergleich mit den Durchmessern ihrer Struktur sehr klein sind, so daß sie als Punkte behandelt werden können. Nach dieser Hypothese übt gleichförmige Bewegung eines Systems mit irgend einer wenn auch noch so hohen Geschwindigkeit keinen inneren Einfluß aus, vorausgesetzt, daß die Konstitution der Materie *vollständig* elektrisch ist, d. h. vorausgesetzt, daß die Atome nur durch den Äther aktiv sind. Der sehr wichtige (weil rein elektrische) Versuch von Trouton und Noble spricht für die Hypothese, ebenso die Abwesenheit eines Einflusses auf die Drehung und Doppelbrechung im magnetischen Feld (Rayleigh und Brace).

Diese Erklärung der Abwesenheit einer Aberrationswirkung zweiter Ordnung wurde allerdings von Poincaré (Pariser Kongreß, 1900) skeptisch aufgenommen. Er wandte ein, daß, wenn in Zukunft auch der Effekt dritter Ordnung gleich Null werden müsse, ein neuer Kunstgriff angewandt werden könne, um auch dies zu bewirken. Allein die Hypothese hat inzwischen (1904) eine unabhängige Bestätigung durch Lorentz gefunden, dessen Untersuchung gezeigt hat, was übrigens leicht zu verifizieren ist, daß Larmors Ansicht richtig ist; daß er sich auf die zweite Ordnung beschränkte, war nicht notwendig. Lorentz verfolgte jedoch die Sache nicht weiter, da schon die Hypothese der infinitesimalen Größe des Elektrons der Untersuchung ein Ziel setzte, und es scheint überhaupt, daß die Sache durch die Untersuchungen von Lorentz nicht gefördert wird. Larmor war von jeher (*Phil. Mag.*, Juni 1904) der Ansicht, daß diese provisorische Hypothese das Feld behauptet, bis sich irgend eine Wirkung gleichförmiger Konvektion bietet; jedes neue negative Resultat bildet eine Bestätigung derselben, aber sie muß wie jede andere physikalische Vorstellung schließlich die Grenzen ihrer Anwendbarkeit erreichen.

Nur negative Elektronen sind im freien Zustand bekannt. Es ist unentschieden, ob dies seinen Grund in einer Einseitigkeit der bis jetzt angewandten experimentellen Mittel hat, oder ob die physische Natur

wirklich unsymmetrisch ist. Wenn das positive Elektron eine Region von besonderer Beschaffenheit bildet, die im Vergleich mit dem negativen Elektron von großen Dimensionen ist, so spielt es vermutlich bei der Umwandlung der Energie nur eine untergeordnete Rolle und kann sich daher leicht der Beobachtung entziehen. Vgl. *Aether and Matter*, § 122. Aber die absolute Struktur eines Elektrons ist wahrscheinlich sehr verschieden von der Verteilung einer elektrischen Ladung auf Kugeln und Ellipsoiden, die bis jetzt zur Veranschaulichung des Elektrons gedient haben.

Die Theorie eines einfachen Moleküls erschien zum erstenmal in *Phil. Trans.*, 13. August 1894, pp. 806—818 (Trägheit rein elektrisch, p. 807; Schätzung der Größe und der Dimensionen, sowie Elektrodynamik der Orbitalbewegungen, p. 814; Halleffekt usw., p. 815). In den Abhandlungen von Lorentz, in denen von 1892, sowie in denen von 1895, findet sich meines Wissens nichts, was den in dieser Abhandlung entwickelten Ideen entspricht.

Was die Theorie des Zeemaneffektes betrifft, so würde für die Veranschaulichung das geeignetste System, welches der Rechnung zugänglich ist, ein statisches sein, in welchem die Elektronen sämtlich um Stellungen stabilen Gleichgewichts schwingen. Hierzu ist aber, wenn sie sich im letzteren Raum befinden, eine äußere Kraft erforderlich. Man hat eine bestimmte Gruppe der Schwingungszeiten für J. J. Thomsons statische Illustration ausgearbeitet, in welcher diese Instabilität eines statischen Systems negativer Elektronen (Satz von Earnshaw) umgangen wird durch die Annahme, daß sie sich innerhalb einer Region gleichförmiger positiver Elektrisierung befinden, die als das positive Elektron betrachtet werden kann. Wenn die Volumdichte desselben gering ist, so wird auch die resultierende Stabilität nur eine geringe sein und eine kleine Verschiebung wird zur Folge haben, daß das System zerfällt; dies ist aber durchaus nicht wahrscheinlich.

Aber es sind hier, wie vorher, nur isotrope Konfigurationen, in demselben Sinne wie in der Hydrokinetik fester Körper in Flüssigkeiten — nämlich diejenigen, bei denen eine gewisse quadratische Funktion ebenso wie bei der Konfiguration der regulären Körper vollständig isotrop sein muß — welche die Linien deutlich spalten, anstatt sie nur zu verbreitern; bei anderen Typen wird dies nur dann der Fall sein, wenn sie sämtlich in dem induzierenden magnetischen Feld gleichförmig orientiert sind.

Die Versuche von Kaufmann berechtigten zu der Hoffnung, daß wir einen Einblick in die innere Struktur des Elektrons gewinnen werden. Sie haben die fundamentale Tatsache bewiesen, daß ein freies Elektron kein unabhängiges materielles Substrat hat; sie haben es sehr wahrscheinlich gemacht, daß es provisorisch als eine Region von sphärisch geschichteter Elektrizität betrachtet werden kann; ebenso daß die Konvektion eines Elektrons die Volumbeziehungen dieser Verteilung nicht beeinflußt (Bucherer); aber leider ist es nicht gelungen, die experimentellen Methoden so zu vervollkommnen, daß sie eine weitere Aufklärung dieser Verhältnisse ermöglichen.

Wir müssen uns noch damit begnügen, das Elektron als einen Punkt oder höchstens als ein sphärisches elektrisches Aggregat irgend welcher Art zu betrachten, dessen Volum einer Abnahme unfähig ist. Allein die gänzliche Abwesenheit von Konvektionswirkungen mancher Art, wie man sie z. B. von der Bewegung der Erde erwarten sollte, spricht sehr zu Gunsten der provisorischen Theorie, daß die letzten Elemente, aus denen die Atome bestehen, in ihren dynamischen Beziehungen reine Ätherstrukturen sind, von denen wir uns einstweilen keine richtige Vorstellung machen können.

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.

COUNTWAY LIBRARY OF MEDICINE